Betonfahrbahn 4.0

Prozesssichere Herstellung von Betonfahrbahnen durch Integration neuer innovativer Maßnahmen und digitale Vernetzung zur Erhöhung von Qualität und Dauerhaftigkeit



Verbundforschungsprojekt im Rahmen des Innovationsprogramms Straße - 10. Förderbekanntmachung -"Prozesssichere Herstellung von Straßen in Betonbauweise"

Abschlussbericht

Projektbearbeitungszeitraum: 01.06.2017-31.10.2021

Allgemeine Informationen

Gemeinsamer fachlicher Abschlussbericht									
FE-Nr.:	88.0151/2017								
Vorhabenbezeichnung:	Betonfahrbahn 4.0 – Prozesssichere Herstellung von Betonfahr- bahnen durch Integration neuer innovativer Konzepte und digi- tale Vernetzung zur Erhöhung der Qualität und Dauerhaftigkeit								
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2017 bis 31.05.2020 (31.10.2021)								
Berichtszeitraum:	01.06.2017 bis 31.10.2021								
	 Universität Stuttgart Verbundkoordinator: Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) Materialprüfungsanstalt (MPA) Institut für Systemdynamik (ISYS) 								
Verbundpartner	Heinz Schnorpfeil Bau GmbH Betonfertiger Wirtgen GmbH Liebherr Mischtechnik GmbH Cavex GmbH & Co.KG Otto Alte-Teigeler GmbH (OAT) LEHMANN+PARTNER GmbH (LP)								

Danksagung

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur für die finanzielle Förderung des Verbundforschungsvorhabens und der Bundesanstalt für Straßenwesen und dem TÜV Rheinland für die stets unterstützende fachliche und verwaltungstechnische Betreuung. Besonderer Dank geht auch an alle Mitwirkenden aller Projektpartner aus Wissenschaft, Bauwirtschaft, Maschinen- und Anlagenbau, ohne deren motiviertes und engagiertes Mitwirken das Forschungsvorhaben nicht hätte umgesetzt werden können. Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitun	g	. 1
	1.1	Mot	ivation und Problemstellung	. 1
	1.2	Aus	gangssituation	. 4
	1.2.	1	Baustoffe und Systeme im Fahrbahnbau	. 4
	1.2.	2	Prozessteilschritte und Systeme bei der Herstellung von Betonfahrbahnen	. 6
	1.2.	3	Messsysteme und Methoden zur Qualitätssicherung	. 8
	1.2.	4	Automatisierung und Digitalisierung	. 9
	1.3	Ziels	setzung und Arbeitsschwerpunkte	10
2	Übe	rsich	t über die wesentlichen Arbeitsziele des Vorhabens	14
	2.1	Ana	lyse der Prozesskette zur Herstellung von Betonfahrbahnen	14
	2.1. Info	1 rmat	Lastenheft zur Erfassung der für die Bewertung erforderlichen Messgrößen u ionen	nd 15
	2.1.	2	Interdisziplinär analysierte Baustellen	16
	2.2	Opti	imierung der Prozessschritte durch innovative Maßnahmen	16
	2.2.	1	Prozesssichere Frischbetonherstellung	16
	2.2.	2	Prozesssicherer Betoneinbau und Nachbearbeitung	18
	2.2.	3	Qualitätsüberwachung während und nach dem Deckeneinbau	19
	2.2.	4	Vermessung der Ebenheit und Beschaffenheit von Fahrbahnoberflächen	19
	2.2.	5	Monitoring und intelligente Vernetzung	20
3	Star	nd vo	n Wissenschaft und Technik	21
	3.1	Prak	tische und wissenschaftliche Ausgangssituation der Betonherstellung	21
	3.1.	1	Herstellung von Frischbeton mit gleichförmigen Eigenschaften	23
	3.1.	2	Herstellung von Fahrbahnbetonen	24
	3.1.	3	Rheologiegestützte Mischprozessführung	26
	3.1.	4	Rheologische Charakterisierung des Frischbetons im Mischer	27
	3.1.	5	Spezifische Anforderngen an die Betonherstellung beim Fahrbahnbau	30
	3.2	Einb	au des frischen Fahrbahnbetons mit dem Gleitschalungsfertiger	32
	3.3	Nac	hbearbeitung der Oberfläche	33
	3.4	Eber	nheitserfassung und -bewertung	39
4	Übe	rblick	c zum Arbeitsplan des Verbundvorhabens "Betonfahrbahn 4.0"	41
	4.1	Arbe 42	eitsschwerpunkt A – Prozesskettenanalyse der gegenwärtigen Betonfahrbahnherstellu	ng
	4.2	Arbe	eitsschwerpunkt B – Schlüsselinnovationen für prozesssichere Teilschritte	43
	4.3	Arbe	eitsschwerpunkt C – Intelligente Betonfahrbahnherstellung durch digitale Vernetzung	45
	4.4	Arbe	eitsschwerpunkt D – Demonstration Betonfahrbahn 4.0 in der Baupraxis	46
5	Arb	eitssc	hwerpunkt A - Prozessanalyse der heutigen Betonfahrbahnherstellung II	48

5.	1 Arbo	eitspaket A1 – Erfassung prozessrelevanter Daten und Parameter
	5.1.1	A1.1 – Rohstoffe, Silobevorratung, Dosierung und Beschickung des Mischers
	5.1.2	A1.2 – Analyse der mobilen Mischanlagen 56
	5.1.3 Einbauor	A1.3 - Analyse der Übergabe des Frischbetons an den Muldenkipper und der Fahrt zum t auf der Baustelle und Übergabe an den Fertiger97
	5.1.4 und Nach	A1.4 - Einbau und Verdichten der Betonlagen mittels Fertiger, Glättung der Oberfläche nbehandlung
	5.1.5 und Schn	A1.5 - Nachbearbeitung der Oberbetonlage – Herstellung der Waschbetonoberfläche neiden der Fugen
	5.1.6 Herstellu	A1.6 - Analyse der Beschaffenheit und Ebenheit der Fahrbahnoberfläche bei heutiger Ing von Betonfahrbahnen
	5.1.7 Messdate Betonfah	A1.7 - Zusammenführung und Dokumentation aller Beobachtungen, Feststellungen und en zur weiteren Analyse und Bewertung der komplexen Prozesskette "Herstellung von arbahnen"
	5.1.8 Definitio	A1.8 - Identifizierung aller prozessrelevanten Daten auf der Teilprozessebene sowie n von Schnittstellen für die digitale Vernetzung
5.	2 A2 -	- Analyse der rheologischen Eigenschaften des Betons163
	5.2.1 eingesetz	A2.1 - Bewertung der Festbetoneigenschaften bisher im Betonfahrbahnbau zter Betone
	5.2.2 eingesetz	A2.2 - Bewertung der Frischbetoneigenschaften bisher im Betonfahrbahnbau zter Betone
6	Arbeitsso	hwerpunkt B – Schlüsselinnovationen für prozesssichere Teilschritte
6.	1 Arb	eitspaket B1 – Rheologie-gestützte Mischprozessführung 196
	6.1.1	B1.1 - Verbesserung der stofflichen Voraussetzungen
	6.1.2	B1.2 - Optimierung des Antriebsstranges der rheologischen Mischprozessführung 242
	6.1.3	B1.3 - Labormaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen
	6.1.4	B1.4 - Optimierung des Antriebsstranges der rheologischen Mischprozessführung 282
	6.1.5	B1.5 - Technikummaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen
	6.1.6	B1.6 - Realmaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen
	6.1.7 Prozessle	B1.7 - Erfassung und Aufbereitung aller prozessrelevanten Daten für die
6	2 Arb	aitsnaket R2 - Methodische Entwicklung von Messystemen
0.	6 2 1	P2.1 Integration von Technologion zur Erfactung und Powertung der Entrichten im
	Betrieb	339
	6.2.2	B2.2 - Entwicklung von Ultraschallmesstechnik zur Bestimmung der Betoneigenschaften 339
	6.2.3 optimier	B2.3 - Mechanische Prüfungen zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften der ten Betone
	6.2.4 Nachbea	B2.4 - Bau eines Experimentalprüfstands an der MPA Stuttgart zur experimentellen rbeitung der Betonoberfläche durch Bürsten und Schneiden

	6.3 Arbo	eitspaket B3 – Integrative Qualitätskontrolle	359
	6.3.1	B3.1 - Erstellung 3-D-Modell der Fahrbahn	359
	6.3.2 Prüfstand	B3.2 - Konzeption & Umsetzung innovativer Messtechnik für Ebenheit dsschlitten	an 360
	6.3.3 Prüfstand	B3.3 - Untersuchung des Einflusses praxisrelevanter Parameter auf Ebenheir dsmaschine	t an . 379
7	Arbeitsso		382
	7.1 Arbo	eitspaket C1 – Ganzheitliche Automatisierungskonzepte	382
	7.1.1 bis hin zu	C1.1 - Analytische respektive empirische Modellierung der Prozesskette vom Mise ur Oberflächenbearbeitung der Fahrbahnbetone	chen . 382
	7.1.2	C1.2 - Modellbasierte Simulation und Analyse des Herstellungsprozesses	387
	7.1.3	C1.3 - Validierung des Potentials innovativer Automatisierungskonzepte	398
	7.1.4	C1.4 - Prozesssicherer Betoneinbau und Optimierung der Einbauqualität	399
	7.2 Arbo	eitspaket C2 – Regelung und Qualitätskontrolle	400
	7.2.2	C2.1 - Auswertung und Aufarbeitung der Daten für die Prozessleitebene	400
	7.2.3	C2.2 - Integration aller entwickelten Sensorkonzepte in die Prozessleitebene	402
	7.2.4 Eigensch	C2.3 - Optimierung des Betoneinbaus unter Berücksichtigung rheologis aften des Betons	cher 402
	7.3 Arbo	eitspaket C3 – Intelligente Vernetzung und Kommunikation	406
	7.3.1 Eigensch	C3.1 - Entwicklung einer modellbasierten Prozessüberwachung der rheologise aften der Werkstoffe	chen 406
	7.3.2	C3.2 - Softwareentwicklung für raumbezogene Aufgaben und Prozesse	408
	7.3.3	C3.3 - Integration der Teilmodelle in das Gesamtkonzept – Prozessleitebene	408
	7.3.4 <i>"</i> Live-Vie	C3.4 - Aufbau und Implementierung der Applikationsplattform und Prozessleitek w"	oene 428
	7.4 Arbe	eitspaket C4 – Validierung und Implementierung	439
	7.4.1 Fertigers	C4.1 - Analyse der Fahrbahnoberfläche: Ebenheit, Eigenschaften des Betons und sowie der Rheologie auf die Betonqualität	des 439
8	Arbeitsso	hwerpunkt D - Betonfahrbahn 4.0 in der Baupraxis	440
	8.1 Arbo	eitspaket D1 – Erprobung und Validierung an realen Demonstratoren	440
	8.1.1 Fahrbahr	D1.1 - Auswahl, Planung und Vorbereitung der als Demonstratoren vorgesehen nabschnitte	en 2 .440
	8.1.2 kommen	D1.2 - Umbau der Antriebsstränge der bei den Demonstratoren zum Eir den mobilen Mischanlage zur rheologiegestützten Mischprozessführung	nsatz 449
	8.1.3	D1.3 - Ergänzende Ausstattung des Gleitschalungsfertigers mit erweiterter Messtec 461	hnik
	8.1.4	D1.4 - Bau der beiden gewählten Betonfahrbahnen	469
	8.1.5	D1.5 - Nachbearbeitung der Fahrbahndecke mittels Bürsten, Schneiden und Grin 481	ding

8.	2 Arb	eitspaket D2 – Aufbereitung und Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten 485
	8.2.1 Optimier	D2.1 - Rückführung der prozessrelevanten Daten im Betrieb zur Validierung und rung des Prozessleitsystems
	8.2.2	D2.2 - Validierung der Eigenschaften der optimierten Fahrbahnbetone
9	Erfahrun	gen mit den angewendeten Methoden, Verfahren und Werkzeugen517
10	Akzep	tanzbewertung
11	Zusam	menfassung und Ausblick
12	Abbild	lungsverzeichnis
13	Tabell	enverzeichnis
14	Literat	urverzeichnis
15	Anhan	
15	5.1 Anla	agen
	15.1.1	Anlage 1: BF4.0 WebApp/Übersicht Betonherstellung.pdf557
	15.1.2	Anlage 2: BF4.0 WebApp/Übersicht Einbauprozess.pdf
	15.1.3	Anlage 3: BF4.0 WebApp/Übersicht Nachbearbeitung.pdf
	15.1.4	Anlage 4: BF4.0 WebApp/Übersicht Frischbetonprotokolle.pdf557
	15.1.5	Anlage 5: BF4.0 WebApp/Übersicht Frischbetonprotokolle erfassen.pdf557
15	5.2 Ver	suchsaufbauten
	15.2.1	Entwicklung eines Labormischsystems zur Abbildung realer Mischsysteme
	15.2.2 Doppelw Mischpro	Beschaffung, Installation und Inbetriebnahme einer realmaßstäblichen vellenmischanlage zur Entwicklung und Erprobung einer rheologiegestützten ozessführung
	15.2.3	Prüfstand zur Entwicklung von Methoden zur Ebenheitsprüfung
	15.2.4 S.T.I.E.R	Mobile Messsysteme zur Erfassung von Ebenheitsparameter - Laserscanning Systeme und I.R.I.S
15 Be	5.3 App etonfahrb	likationsplattform als zentrales Prozessleitsystem für die Erfassung und Bewertung der bahnherstellung
	15.3.1	Architektur
	15.3.2	Datenzusammenführung und Anzeige am Beispiel Köln-Wahn I
	15.3.3	Erweiterung um Datenerfassung mittels Onlineformularen in Wittlich II
	15.3.4	Zentrale Echtzeitprozesssteuerung BF4.0 WebApp 579
15	5.4 MPS	S3 Dashboard
	15.4.1	MPS3 DASHBOARD – PRODUKTIONSSTATISTIK
	15.4.2	MPS3 DASHBOARD – WAAGESYSTEM
	15.4.3	MPS3 DASHBOARD – MATERIALFEUCHTE
15	5.5 Übe	rsichtsinformationen zu den Baustellen

15.5.1 Ludwigsh	Dieblich-Boppard BAB A61 (TEIL I) (Station 234+430 bis zur Station 237+250 nafen)	, FR .584
15.5.2 Ludwigsh	Dieblich-Boppard BAB A61 (TEIL II) (Station 237+250 bis zur Station 241+250	i, FR 587
15.5.3	BAB A1 AK Wittlich - AS Salmtal – km 116,000 bis 111,900 (Wittlich I)	589
15.5.4	Flughafen Köln-Wahn (Flugvorfeld)	592
15.5.5	BAB A1 AS Salmtal - AK Wittlich – km 116,000 bis 109,000 (Wittlich II)	596
15.5.6	A7 Hamburg	598
15.5.7	A9 Berlin	598
15.5.8	Flughafen Köln-Wahn (Sommer 2019)	600
15.5.9	AS Leipzig – AD Schkeuditz BAB A14	600
15.5.10	Flughafen Stuttgart	602

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG

Deutschland besitzt eine der leistungsfähigsten Verkehrsinfrastrukturen in Europa. Diese stellt die Grundvoraussetzung für eine hohe Mobilität, die ihrerseits Voraussetzung für ein wirtschaftliches Wachstum, für Beschäftigung und Teilhabe der Einzelnen am gesellschaftlichen Leben ist. Entsprechend wurde bereits im Bundesverkehrswegeplan 2003 [BMVI 2016] festgelegt, die Verkehrsinfrastruktur bis 2015 mit Investitionen in Höhe von 150 Mrd. Euro zu stärken. Kernanliegen des Bundesverkehrswegeplan 2030, im Weiteren BVWP 2030, sind der Erhalt der Bestandsnetze und die Beseitigung von Engpässen auf Hauptachsen und in wichtigen Verkehrsknoten. Entsprechend sollen vom Gesamtvolumen des Plans von rd. 269,6 Mrd. € allein bis 2030 rd. 141,6 Mrd. € in den Erhalt der Bestandsnetze gehen. Für den Aus- und Neubau von Verkehrswegeprojekte sind rd. 98,3 Mrd. € vorgesehen. Die Erhaltungsbedarfsprognose für die Bundesfernstraßen wurde mit Blick auf die Fahrbahnbefestigungen auf der Grundlage eines rechnergestützten Erhaltungsmanagementsystems (Pavement-Management-System) erstellt, die seit dem Jahr 2010 zustandsbezogen aktualisiert wird [Maerschalk et al. 2004], [FE32.0054 2012]. In die Berechnungen zur Zustandserfassung und -bewertung der Oberflächeneigenschaften der Bundesautobahnen (ZEB) 2013/2014 und der Bundesstraßen ZEB 2011/2012 der Bundesstraßen fließen die bundesnetzweiten Daten zu Alter und Art der einzelnen Schichten der Straßenbefestigungen ein. Aus den Berechnungen werden zudem notwendige Eingriffszeitpunkte und mögliche Erhaltungsmaßnahmen in ihrer Wirksamkeit bewertet und optimiert.

Die Verkehrsprognosen im BVWP 2030 zeigen dabei, dass es notwendig sein wird, vor allem für die besonders belasteten Teile des Straßennetzes infrastrukturelle Verbesserungen vorzunehmen. Die Bundesländer meldeten insgesamt über 2.300 Gesamt- bzw. Teilprojekte zur Bewertung an, wobei der BVWP 2030 den Schwerpunkt in den Investitionen im Bereich der großräumig wirksamen Projekte sieht. Dabei werden 75 % der Investitionsmittel in Aus- und Neubauprojekte großräumig wirksamer Straßen fließen, da diese Magistralen einen Großteil der prognostizierten Verkehrszunahme aufnehmen müssen.

Die Erhaltung der kontinuierlich gewachsenen Bundesfernstraßeninfrastruktur, hier handelt es sich um rd. 13.000 km Bundesautobahnen und rd. 39.000 km Bundesstraßen, hat im BVWP 2030 eine zentrale Bedeutung, da infolge wachsender Beanspruchungen und ungünstiger werdender Altersstruktur der Straßen- und Brückensubstanz die Beeinträchtigungen des Verkehrswegenetzes immer größer werden. Um den Verkehrsanforderungen weiterhin genügen zu können, steht für einen großen Teil des Bestands an Bundesautobahnen in den nächsten Jahren eine Grunderneuerung der Fahrbahnbefestigungen und eine Grundinstandsetzung oder Ertüchtigung der zugehörigen Ingenieurbauwerke an. Entsprechend ist es im BVWP 2030 ein vorrangiges Ziel, die Ausführungsqualität der Baumaßnahmen deutlich zu steigern. So kann beispielsweise im Falle des Baus von Betonfahrbahnen durch die Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften der eingebauten Betone während des gesamten Herstellungsprozesses von Bundesautobahnen die Dauerhaftigkeit signifikant gesteigert werden. Daraus resultieren längere baustellenfreie Zeitintervalle, in denen der Verkehr uneingeschränkt fließen kann.

Die Erfassung und Bewertung der Fahrbahnzustände (ZEB) erfolgt regelmäßig alle vier Jahre. In die PMS Berechnungen gehen die Zustandsoberflächenmerkmale (der ZEB), die Daten zur Verkehrsstärke wie auch die Informationen zum Aufbau der Straße ein, wobei auch die Erhaltungsgeschichte in der Prognose Berücksichtigung findet. Merkmale der Längs- und Querebenheit, der Griffigkeit sowie Oberflächenschäden beschreiben den "Substanz-" und "Gebrauchswert" einer Straßenoberfläche. Zusammen mit Informationen über Art, Dicke und Alter der Fahrbahnbefestigung kann eine rechtzeitige und wirtschaftliche Erhaltung einer Straße realisiert werden.

Zur Erhaltung des Bundesfernstraßennetzes ist für den Zeitraum von 2016 bis 2030 ein Bedarf von insgesamt rd. 67 Mrd. € errechnet worden. Auch der Bundesrechnungshof befasste sich mit dem nicht-öffentlichen Bericht zu den Erhaltungsbedarfsprognosen für Bundesfernstraßen und kam zum Ergebnis, dass sich die im Bundeshaushalt zu veranschlagenden Erhaltungsmittel an der Erhaltungsbedarfsprognose und an der Baupreisentwicklung orientieren müssen. Zudem sollte die Erhaltungsbedarfsprognose in kürzeren Abständen aktualisiert werden, da sich technische Regelwerke, Verkehrsbelastungen und Zustände der Fernstraßen kontinuierlich ändern. Angestrebt wird folglich ein höheres Zustandsniveau, auch wenn damit ein erheblicher finanzieller Mehraufwand verbunden ist. Aus Sicht des Bundesrechnungshofes wäre es zudem zielführend, vermehrt auf substanzverbessernde Grunderneuerungen zu setzen. Grundsätzlich erwartet der Bundesrechnungshof deutlich höhere Erhaltungskosten, die für die Jahre 2021 bis 2025 auf bis zu 3,8 Mrd. Euro beziffert werden. Im Vergleich setzt der Etatentwurf 2016 des BMVI rund 2,9 Mrd. Euro an.

Um gemäß den Vorgaben des BVWP 2030 zukünftig eine nachhaltige Bundesfernstraßeninfrastruktur zu schaffen, bedarf es vielfältiger Anstrengungen, um den komplexen Prozess der Herstellung von Fahrbahnen zu verbessern. Schließlich wird eine hohe Qualität an Ebenheit und Griffigkeit sowie eine hohe Dauerhaftigkeit und lange Nutzungsdauer erwartet. Da Fahrbahnen aus Beton belastbarer sind und in der Regel auch eine längere Lebensdauer als Fahrbahnen aus Asphalt haben, kommt bei hochbeanspruchten Flächen zunehmend die Betonbauweise zum Einsatz. Schon heute verfügen knapp 30 % der Bundesautobahnen über eine Fahrbahndecke aus Beton.

Um im Sinne des BVWP 2030 bei Betonfahrbahnen eine hohe Qualität in der Ausführung und eine hohe Dauerhaftigkeit im Laufe der Nutzung von Betonfahrbahnen sicherstellen zu können, ist eine detaillierte Analyse aller bei Betonfahrbahnherstellung gegebenen Teilprozessschritte vorzunehmen, um all jene Prozessverläufe zuverlässig identifizieren und verbessern zu können, die eine Gefährdung der erforderlichen Ausführungsqualität und Oberflächenbeschaffenheit bewirken können.

Seit einigen Jahren steht auch im Betonstraßenbau die Automatisierung des Herstellungsprozesses im Fokus. Im Kontext mit den umweltpolitischen Zielen von Ressourcenschonung und Umweltverträglichkeit wurden zudem vielfältige Material- und Stoffoptimierungen auch im Betonfahrbahnbau realisiert. Doch reichen die bisherigen Anstrengungen nicht aus, eine auf das äußerst sensible Stoffsystem der Fahrbahnbetone angepasste Prozessführung zu realisieren. Folglich bedarf es kurzfristig dringlicher Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, in denen die hohe Empfindlichkeit der Eigenschaften der Fahrbahnbetone im frischen und festen Zustand herausgearbeitet wird, um bei der Fahrbahnherstellung den sich im Bauverlauf immer wiederkehrend verändernden Ausgangsstoffverhältnissen, Witterungsrandbedingungen und Produktionsverhältnisse zur Sicherstellung eines gleichförmigen Qualitätsniveaus in geeigneter Weise gegenzusteuern.

In allen Teilprozessen der Herstellung von Fahrbahnbetonen kommt dem rheologischen Verhalten der Frischbetone vom Vermischen der festen und flüssigen Ausgangsstoffe im Zwangsmischer bis hin zum Einbau und Verdichten mit dem Gleitschalungsfertiger eine zentrale Bedeutung zu, soll ein hohes Maß an Ebenheit der Fahrbahnoberfläche zielsicher erreicht werden. Zudem werden eine sehr gute Griffigkeit und eine Reduzierung des Reifen-Fahrbahngeräusches gefordert, weshalb die Fahrbahnoberflächen texturiert werden. Seit 2006 werden standardmäßig Waschbetonoberflächen hergestellt, indem nach ausreichender Betonerhärtung im jungen Alter der Oberflächenmörtel ausgebürstet und die oberflächennahe Gesteinskörnung freigelegt werden. Etwas später werden zur Vermeidung von unkontrollierten Fahrbahnrissen Fugenschnitte in Querund Längsrichtung der Fahrbahnen vorgenommen. Beide Nachbearbeitungsmaßnahmen setzen voraus, dass es gelingt, während der frühen Phasen der Betonerhärtung belastbare Ergebnisse zur Frühfestigkeit und Steifigkeit zu erhalten, um eine Schädigung des Gefüges durch ein zu frühes Bürsten oder Schneiden zu vermeiden.

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Warentransports über die Straße und des dabei steigenden Schwerlastanteils werden auch höhere Anforderungen an die Ebenheit der fertigen Fahrbahnoberfläche gestellt. Unebenheiten im Querprofil einer Straße beeinflussen vor allem die Fahrsicherheit und sind ein wichtiger Indikator für die strukturelle Kapazität einer Fahrbahndecke. Unebenheiten im Längsprofil dagegen beeinflussen nicht nur den Fahrkomfort für die Straßennutzer:innen, sondern führen aufgrund erhöhter dynamischer Radlasten auch zu einer stärkeren Beanspruchung der Bausubstanz und somit zu einer Verringerung ihrer Lebensdauer [Lothenbach et al. 2006]. Zur Erfassung und Bewertung der Ebenheit im Zuge der Abnahme können berührende Verfahren (4m-Richtlatte, Planograf, Profilograf) aber auch berührungslose Verfahren zum Einsatz kommen. Da die berührenden Mess-verfahren und die daran gekoppelten Indikatoren dem Nachteil unterliegen, nur eingeschränkte Wellenlängen-bereiche abbilden zu können [Thomas et al. 2011], wurden in der jüngeren Vergangenheit komplexere Bewertungsverfahren untersucht, um die Aspekte Fahrkomfort, Sicherheit und Lebensdauer der Oberfläche umfassender zu adressieren, als es mit den bisher maßgeblichen Erfassungstechnologien und Bewertungsindikatoren möglich ist. In Mitteleuropa betrifft dies konkret das aus dem Höhenlängsprofil einer Fahrbahnoberfläche abgeleitete sogenannte Bewertete Längsprofil (WLP), welches auf deutscher und europäischer Ebene Einzug in Regelwerke und Normen hält (DIN EN 13036-5) und im Rahmen des Forschungsprojektes "FE 04.0286/2014/DGB - Erweiterung des Einsatzes des Bewerteten Längsprofils auf bauvertragliche Anwendungen und Vergleich mit dem herkömmlichen Abnahmeverfahren" abschließend untersucht wurde. In Ergänzung zu dem HRM-Verfahren (High-Speed Road Monitoring), bei dem in einer linearen Anordnung vier Laserdistanzsensoren zur Aufnahme von lang- und kurzweiligen Straßenanregungen verwendet werden, ermöglichen moderne Erfassungsmethoden, wie beispielsweise mobiles Laserscanning, eine schnelle und vor allem flächenhafte Erfassung von Fahrbahnoberflächen, die dem dreidimensionalen Charakter einer Straßenoberfläche vielmehr gerecht werden, als eine zweidimensionale Repräsentation in Form von Höhenlängsprofilen. Eine vergleichende Untersuchung zwischen klassischen berührungslosen Messmethoden und der Erfassung eines Längsprofils aus Laserlichtschnittverfahren und Laserscanning ist Gegenstand des Forschungsprojektes "FE 04.0326/2018/DGB - Fortschreibung von Qualitätsstandards zur Abnahme von Ebenheitsmesssystemen für ZEB- und Abnahmemessungen vor dem Hintergrund neuer Erfassungstechnologien", im Rahmen dessen auch die im Verbundprojekt eingesetzte Technologie systematisch evaluiert wird. Entsprechend bedarf es zunächst der eingehenden Analyse der bislang in der Baupraxis immer wiederkehrend zu beobachtenden Mängel und Probleme bei der Herstellung von Betonfahrbahnen. Da zahlreiche Prozessschritte von der Vorbereitung des Untergrundes, über den Einbau der Betonfahrbahndecke, über die erforderlichen Nacharbeiten sequentiell abzuarbeiten sind und die aufeinander folgenden Prozessschritte fließend ineinander übergreifen, widmen sich die Partner des Verbundvorhabens einer eingehenden Analyse der gesamten Prozesskette "Herstellung von Betonfahrbahnen". Nach Auswertung aller aufgezeichneten Daten und Informationen soll eine ganzheitliche Betrachtung zur Identifikation aller möglichen Verbesserungen vorgenommen werden. Folglich sollen die diversen Prozesstechnologien hinsichtlich möglicher Verbesserungen analysiert und alle für die einzelnen Prozessschritte relevanten Prozessinformationen transparent offengelegt werden.

Kommen moderne Technologien der digitalen Erfassung von Prozessparametern zum Einsatz und werden die zahlreichen Prozessschritte künftig digital miteinander vernetzt, lässt sich eine intelligente und vom Prozessverlauf abhängige Herstellung von Betonfahrbahnen entsprechend der Grundsätze von Industrie 4.0 realisieren. Ziel sollte künftig eine prozesssichere Herstellung von Betonfahrbahnen sein, in dem mittels moderner Informations- und Kommunikationstechniken die Teilprozesse der bautechnischen Herstellung von Betonfahrbahnen baubegleitend beobachtet, bewertet und durch bedarfsgerechte Einflussnahme optimiert und aufeinander abgestimmt werden können. Die technische Grundlage hierfür ist grundsätzlich gegeben, bedarf aber der intelligenten und digitalen Vernetzung der in der Prozesskette Betonfahrbahnherstellung gegebenen Teilprozesse. Wird mit Industrie 4.0 üblicherweise eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion angestrebt, in der Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte miteinander kommunizieren und kooperieren, so lassen sich die grundsätzlichen Organisations- und Interaktionsgedanken grundsätzlich auch auf den Prozess der Herstellung von Betonfahrbahnen übertragen. Entscheidend ist die Digitalisierung und Vernetzung aller Prozessschritte, um nicht mehr nur einen einzelnen Produktionsschritt, sondern eine ganze Wertschöpfungskette zu optimieren. Die digitale Vernetzung lässt sich dabei auch nach dem Herstellprozess der Betonfahrbahn nutzen, schließlich lassen sich die Informationen der Informations- und Kommunikationstechnik auch in den weiteren Phasen des Lebenszyklus für den optimierten Betrieb und Erhalt der Betonfahrbahnen entsprechend der Zielsetzung des BVWP 2030 wirkungsvoll und nachhaltig nutzen. Dies ermöglicht von der Planung, über die Vorbereitung und den eigentlichen Bau der Betonfahrbahn hinaus auch im Zuge der Nutzung und Wartung dem ZEB die erforderlichen Informationen übergeben zu können, die selbst beim Rückbau und Recycling von großem Nutzen sein werden.

1.2 AUSGANGSSITUATION

1.2.1 Baustoffe und Systeme im Fahrbahnbau

1.2.1.1 Betonbauweise

In Deutschland hat sich die Betonbauweise im Straßenbau insbesondere wegen ihrer hohen Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit bewährt. Aus diesem Grund werden beispielsweise im Rahmen von ÖPP-Modellen derzeit hauptsächlich Straßenaufbauten in Betonbauweise ausgeführt. Unabhängig vom Finanzierungsmodell und dem gewählten Oberbau wird der Deckenbeton auf Autobahnen in den meisten Fällen zweischichtig (Oberund Unterbeton) hergestellt [Oesterheld et al. 2019]. Alle anderen Flächen werden einschichtig hergestellt. Für die konventionelle Herstellung fanden bisher Straßenbetone Anwendung, die gegenüber Veränderungen innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches im Herstellungs- und Einbauprozess als relativ robust einzuordnen sind. Die stetige Zunahme der Verkehrsbelastung sowie die Absicherung einer hohen Verfügbarkeit und Dauerhaftigkeit haben zur Folge, dass die Anforderungen an den Baustoff "Beton" ständig wachsen. Dem wurde und wird u. a. durch die Weiterentwicklung der Zemente, Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe Rechnung getragen. Zudem wird zur Begrenzung der CO2-Emissionen zunehmend der Anteil an Portlandzementklinker in Betonen reduziert und es finden alternative Bindemittelsysteme und Betonzusatzstoffe Einsatz in der Betonbauweise, die i.a. zu feinkornreicheren Betongemischen führen. Diese Trends gehen jedoch mit einer signifikanten Steigerung der Sensibilität des Stoffsystems "Beton" einher, so dass die Verwendung der heutigen Betongemische eine sehr genaue Dosierung der einzelnen Ausgangsstoffe sowie einen optimalen Aufschluss insbesondere der Feinstoffe sowie eine schnelle und zielsichere Verteilung und Aktivierung der Zusatzmittel erfordern. Entsprechend bedarf es heute einer kontrollierten Mischprozessführung.

1.2.1.2 Betonrezeptur

Das übergeordnete Ziel, Fahrbahnen mit deutlich höherem Lärmminderungspotenzial in Zukunft zu realisieren, erfordert aber auch die Entwicklung neuer Baustoffsysteme. Hier wurden in der Baupraxis und Wissenschaft erste Betonrezepturen entwickelt. Es zeigte sich aber bislang, dass der Einsatz dieser neuen Materialien eine Anpassung des Misch- und Einbauprozesses erfordert, bevor diese in der Baupraxis Einsatz finden können. Um hierfür effiziente Lösung erarbeiten zu können, bedarf es einer eingehenden Analyse der aktuellen Prozesskette, um festzustellen, an welchen Stellen eine Anpassung der Material- und Maschinenparameter notwendig ist, um eine automatisierte Fertigung der Fahrbahn mit der gewünschten Qualität sicherstellen zu können.

1.2.1.3 Materialeigenschaften des Frisch- und Festbetons

Neben dem wirtschaftlich/technologisch wichtigen Aspekt der Ausstoßleistung rückt beim Fahrbahnbau zunehmend die Forderung einer gleichbleibenden Qualität des Frischbetons in den Vordergrund. Bekanntlich sind die im Fahrbahnbeton verwendeten Gesteinskörnungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit natürlichen Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen wirken sich nicht nur auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, sondern auch auf die mit der Betonerhärtung sich einstellenden Festbetone aus. In der Baupraxis mangelt es an geeigneten Kennwerten, mit denen sich die zum Einsatz kommende Gesteinskörnung zuverlässig charakterisieren lässt. Gesucht werden folglich Verfahren und Methoden, mit denen die für das Frisch- und Festbetonverhalten maßgebende Packungsdichte der Gesteinskörnung zuverlässig erfasst, bewertet und gezielt gesteuert werden kann. Bis heute fehlen in der baupraktischen Umsetzung zuverlässige Ansätze, mit denen mittels dreidimensionaler Kornbetrachtungen eine optimale Packungsdichte bei der Frischbetonherstellung sichergestellt werden kann, die eine gleichmäßige Qualität der hochwertigen Betonherstellung sicherstellen würde.

Kommt eine Baumaßnahme zur Umsetzung, werden hohe Qualitätsstandards gefordert, um eine hohe Dauerhaftigkeit der Betondecke sicherzustellen. Nach der Frischbetonherstellung erfolgt die Übergabe an die Transportfahrzeuge (Muldenkipper, vereinzelt Fahrmischer), die den Frischbeton vom Mischwerk (Mischplatz) zum Einbauort transportieren. Hierbei ist wichtig, dass der Frischbeton in einem bestimmten Zeitfenster und ohne Entmischungen be- und entladen sowie transportiert wird. Dieser Prozess ist bis heute stark konventionell geprägt. Anpassungen an die aktuellen Entwicklungen in der Betontechnologie werden nur vereinzelt vorgenommen. Beispielsweise werden zur Einhaltung der geforderten Frischbetonkennwerte bis heute an den Übergabepunkten (Mischwerk/Transportfahrzeug/Einbauort) punktuell die allgemeinen Frischbetonkennwerte, das Verdichtungsmaß, die Frischbetontemperatur, der Luftporengehalt, etc. charakterisiert.

1.2.1.4 Modellierung des Betonverhaltens während der Hydratation

Bei der Hydratation von Beton treten viele verschiedene chemische, mechanische und thermodynamische Prozesse auf, welche teilweise parallel, zeitlich versetzt oder mit unterschiedlichen Zeitkonstanten ablaufen. Diese Prozesse können zum Teil nur sehr aufwendig messtechnisch erfasst werden [Lothenbach et al. 2006]. Entsprechend existieren zur Modellierung des Betonverhaltens während der Hydratation in Abhängigkeit der relevanten Effekte und des gewählten Größenmaßstabs insbesondere drei Modell-Klassen:

- Mikro-Struktur-Modelle: Die betrachtete Größenordnung dieses Modellierungsansatzes ist im Mikrometer-Bereich. Somit liegt der Fokus auf der Abbildung der Veränderung der inneren Struktur der Betone bei der Hydratation, beispielsweise aufgrund der Zement-Wasser-Reaktion. Eine Übersicht über verschiedene Mikrostruktur-Modelle kann [Thomas et al. 2011] entnommen werden.
- Makro-Struktur-Modelle: Bei diesem Ansatz liegt die betrachtete Größenordnung im Meter-Bereich. Damit werden alle mikroskopischen Prozesse in volumenbilanzierte Größen über ein Gitter zusammengefasst und durch Methoden der irreversiblen Thermodynamik und Kontinuums-Mechanik bilanziert. Eine Übersicht über die Entwicklung von Makro-Struktur-Modellen kann [Wan et al. 2016] entnommen werden.

• *Meso-Struktur-Modelle:* In dieser Klasse ist die betrachtete Größenordnung im Millimeter-Bereich. Analog zu den Makro-Struktur-Modellen werden bei diesem Ansatz alle mikroskopischen Prozesse zu einem phänomenologischen Prozess zusammengefasst. Des Weiteren werden Inhomogenitäten des Materials explizit berücksichtigt, beispielsweise der Einfluss von groben Zuschlägen. Ein Ansatz zur Modellierung im Meso-Struktur-Bereich kann [Wan et al. 2016] entnommen werden.

1.2.2 Prozessteilschritte und Systeme bei der Herstellung von Betonfahrbahnen

1.2.2.1 Mischanlagen und -systeme zur Herstellung von Frischbeton

Die Herstellung des Frischbetons im Bereich des Betondeckenbaus erfolgt gegenwärtig bei Großbaustellen im Regelfall mit großen mobilen Mischanlagen in Containerbauweise, die über eine Mischkapazität von bis zu 300 m³/h verfügen. Als Mischsysteme kommen überwiegend Doppelwellenzwangsmischer zum Einsatz, wie diese in mobilen und stationären Mischanlagen meist zu finden sind. Zur besseren Vermischung und Homogenisierung aller Ausgangsstoffe werden vielfach die Geometrie und Anordnung der Mischwerkzeuge wie auch die Geschwindigkeit der Mischwerkzeuge optimiert bzw. verändert. Da der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung stetigen Schwankungen unterworfen ist und die am Korn anhaftende Feuchte die Konsistenz der Betone maßgeblich beeinflusst, kommt der Kornfeuchtebestimmung insbesondere bei der Fraktion mit der größten Oberfläche – dem Sand - eine große Bedeutung zu. Für einen gleichmäßigen Mischprozess ist es unabdingbar den Ausgangswassergehalt der groben und feinen Gesteinskörnung kontinuierlich zu erfassen und die Messwerte bei der Frischwasserdosierung chargenweise zu berücksichtigen.

Die heute im Einsatz befindlichen Mischsysteme sind aber für die Herstellung von Frischbetonen mit sehr niedrigem Wasserbindemittel- bzw. Wasserzementwert und hohen Feinkornanteilen nicht immer geeignet. Um auch für die anspruchsvollen Gemische der Fahrbahnbetone eine vollständige Homogenisierung der Ausgangsstoffe sicherstellen zu können, sind ggfs. deutlich längere Mischzeiten erforderlich. Dabei spielt nicht alleine die Mischdauer, sondern auch die Intensität des Energieeintrags beim Mischen eine zentrale Rolle. So lassen sich für die feinkornreichen und wasserarmen Gemische der Fahrbahnbetone mit niedrigen Mischwerkzeuggeschwindigkeiten meist nicht die geforderten Frischbetoneigenschaften zielsicher erreichen. Wird demgegenüber die Werkzeuggeschwindigkeit zur Erreichung einer besseren Mischgüte erhöht, führt dies zu einer guten Durchmischung und Homogenisierung der gröberen Komponenten. Dabei nimmt aber infolge des höheren Energieeintrags u.U. die Frischbetontemperatur deutlich zu. Da die Wirkung der Fließmittel vielfach von der Temperatur des Gemisches abhängig ist, verschlechtert sich das Konsistenzverhalten mit zunehmender Frischbetontemperatur. Eine Erhöhung der Werkzeuggeschwindigkeit in Standard-Mischsystemen kann folglich zum frühzeitigen Verlust der geforderten Verarbeitbarkeit der Frischbetone führen. Hinzu kommt, dass sich beim Mischprozess so genannte Granalien- oder Konglomeratbildungen ergeben, weil die flüssigen Ausgangsstoffe (Wasser und Zusatzmittel) systembedingt nicht homogen verteilt und/oder aufgeschlossen werden können. Zudem ist aus der Praxis bekannt, dass Schwankungen der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung eine Störung im Mischprozess darstellen kann und sich hierdurch vielfach die geforderte Konsistenz des Frischbetons nicht zielsicher erreichen lässt. Derartige Störungen des Mischprozesses lassen sich mit der konventionellen Mischprozessführung und der hierbei zum Einsatz kommenden Mess-, Steuer- und Regeltechnik nicht vermeiden. Entsprechend werden gegenwärtig neuentwickelte Betone im Straßenbau, z.B. Ultrahochfester Beton (UHPC) und offenporiger Beton (OPB), in der Praxis so gut wie nicht hergestellt.

1.2.2.2 Systeme zum Einbau und zur Nachbehandlung von Fahrbahnbetonen

Zur Herstellung der Betonfahrbahndecke kommt ein Gleitschalungsfertiger zum Einsatz, der den Herstellungsprozess der Betondecke aus einer einlagigen Betonlage oder aus einem zweilagigen Ober- und Unterbeton in mehreren Einzelprozessen vornimmt: Vorverteilung, Verteilung, Verdichten, Dübel- und Ankersetzen, Glätten und Nachbehandlung. Für den qualitätsvollen Einbau der Betone mit dem Gleitschalungsfertiger werden Betone mit einer gleichbleibenden "steifen Konsistenz" benötigt. Diese Betone müssen beim Einbauprozess eine hinreichende Grünstandfestigkeit erreichen. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass die bei der Fertigung eingesetzten Dübel und Anker ihre räumliche Lage beibehalten. Die Forderung nach kurzen Bauzeiten führt zunehmend zu einem Einbau im 24-Stunden-Betrieb. Dabei kommt der kontinuierlichen Belieferung der Einbaugeräte mit Frischbeton von gleichbleibender Konsistenz eine große Bedeutung zu, die aber durch im Tagesverlauf und/oder stofflich bedingt auftretenden Schwankungen von Temperatur, Witterung, Feuchtigkeit der Gesteinskörnung, Zementtemperatur, etc. Veränderungen in den Frischbetoneigenschaften hervorrufen können. Abhilfe könnte ein zeitnahes Erkennen sowie eine kontinuierliche Feinabstimmung zwischen Fertigungs- und Mischprozess schaffen, wie diese über den heutigen Stand der Technik weit hinausgehendend im Vorhaben realisiert werden sollen, um Qualitätsverluste und wirtschaftliche Schäden zu vermeiden.

Beim Betoneinbau kommt der verfügbaren Verdichtungstechnik und -technologie eine große Bedeutung zu. Ein zu hoher Verdichtungsenergieeintrag und/oder ein schlecht abgestimmter Innenrüttler können rasch zu Entmischungserscheinungen im Frischbeton führen, so dass in der Betondecke unerwünschte Rüttelgassen entstehen. In diesem Zusammenhang können Erkenntnisse aus der Literatur für eine erste Einschätzung des Potentials der Rüttelenergie herangezogen werden. So wurde bereits 1999 eine Studie von [Cable et al. 1999] zur Überwachung der Vibration bei unterschiedlichen Rüttlern und Rüttelfrequenzen sowie Fertigergeschwindigkeiten vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Studie deuten darauf hin, dass die Überwachung einer konstanten Vibrationsrate sowohl dem Auftragnehmer als auch dem Auftraggeber eine gute Möglichkeit bietet, um die Gleichmäßigkeit zu gewährleisten und ein qualitativ hochwertiges Betonstraßenprodukt zu erzielen. Mit moderneren Methoden wie z.B. in [Zi et al. 2019], [Banfill et al. 2011] gezeigt, wurde zudem der Verdichtungszustand bezogen auf die Entfernung zum Rüttler untersucht. Die Studien zeigen, dass typische Werte des Aktionsradius, also des Bereichs, in dem der Beton verflüssigt wird, bei ca. 20 cm Aktionsradius liegt. Zudem wird der Einfluss verschiedener Parameter untersucht. Es zeigt sich, dass die Betondichte einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Effektradius hat. Der Aktionsradius nimmt mit zunehmender Fließspannung ab, nimmt aber mit zunehmender plastischer Viskosität zu. Der Aktionsradius nimmt mit zunehmendem Rüttlerdurchmesser, zunehmender Frequenz und Amplitude zu, wobei die Zunahme in einigen Fällen gering ist.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellt die zielsichere Erreichung der Ebenheit dar. Diese beginnt mit der Höhenabtastung des Leitdrahtes bzw. der Referenzfläche. Hierbei ist eine möglichst hohe Genauigkeit der Abtastung erforderlich, die ermittelten Kennwerte müssen aber vor einer Umwandlung hinsichtlich der Längsebenheit optimiert und dann in Steuerungssignale umgewandelt werden. Nach dem eigentlichen Einbau des Betons erfolgt eine weitere Ebenheitsverbesserung mittels Quer- und Längsglätter.

1.2.2.3 Methoden zur Nachbearbeitung von Betonfahrbahnen

Ein immer wieder kehrendes Problem stellt die Feststellung der Moment-Imperfektionen dar, deren Ursache ggf. in dem nicht korrekt gewählten Zeitpunkt des Fugenschneidens zu sehen ist. Um hier Abhilfe zu schaffen, soll im Vorhaben der richtige Schneidzeitpunkt für den Kerbschnitt anhand der zerstörungsfreien Erfassung der Temperatur- und Festigkeitsentwicklung des Betons herausgearbeitet werden. Damit könnten mitunter früher Fugen geschnitten werden, wenn die erforderliche Festigkeit erreicht ist. Andererseits kann der unkontrollierten Rissentstehung durch ein zu spätes Fugenschneiden entgegengetreten werden, die wie bekannt zu Einbußen der Dauerhaftigkeit der Betondeckenkonstruktion und damit zu einer Verringerung der Lebenszeit

der Fahrbahn führen. Im Vorhaben soll daher über den Stand der Technik hinaus eine messtechnische Ermittlung des "optimalen Schneidzeitpunktes" realisiert werden, die die Prozesssicherheit der Oberflächenbearbeitung signifikant erhöht.

Hinsichtlich der Verkehrssicherheit wird an die Straßeninfrastruktur zudem die Anforderung gestellt, die Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Entsprechend müssen Fahrbahnoberflächen griffig, eben, leise und vor allem dauerhaft sein. Mit einer Waschbetondecke wird eine Lärmminderung um -2 dB(A) erreicht. Mit dem Grindingverfahren lassen sich mindestens gleiche bzw. eher höhere Lärmminderungswerte erzielen. Mit einer weiteren Optimierung der Ebenheit und der Oberflächentextur lassen sich die Griffigkeit und Lärmminderung aber noch weiter steigern. Um auch hier eine Fortentwicklung im Vergleich zum Stand der Technik zu erreichen, ist im Vorhaben ein Experimentalprüfstand vorgesehen, mit dem die Qualität und zielsichere Herstellung der Oberflächentextur sowohl für den Waschbeton wie auch das Grinding nebst der Ebenheitsverbesserung an kleinen aber repräsentativen Fahrbahnoberflächen herausgearbeitet werden kann. Somit kann der Zeitpunkt des Beginns der Arbeiten zur Oberflächentexturierung (Bürsten bzw. Grinden) und zum Schneiden der Fugen systematisch bestimmt werden.

1.2.3 Messsysteme und Methoden zur Qualitätssicherung

1.2.3.1 Messmethoden und Techniken zur Erfassung der Materialparameter

Einzelne Materialparameter von Frisch- und Festbetonen lassen sich mittels Ultraschallmessungen bestimmen. Kommerziell sind diverse Ultraschallmessgeräte für die Charakterisierung des Erstarrungsverhaltens und die Bestimmung des dynamischen E-Moduls, der mit fortschreitender Erhärtung zunimmt. Im Vorhaben werden auf dem Stand der Technik aufbauend die Messgeräte "Solidcheck" und "FreshCon" eingesetzt und deren jeweiligen Technologien verknüpft, um zuverlässig den Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns und Erstarrungsendes aber auch den dynamischen Elastizitätsmodul im Zuge der sich mit der Hydratation einstellenden Festigkeitsentwicklung zu erfassen, wie er zur objektiven Feststellung des geeigneten Zeitpunkts für die Durchführung des Fugenschnitts und der Oberflächenbearbeitung mittels Bürsten wünschenswert wäre. Derzeit wird dieser für die Qualität der Fahrbahn wesentliche Zeitpunkt des Fugenschneidens und der Oberflächenbearbeitung zur Lärmminderung des Fahrbahnbelags eher subjektiv durch ein Anreißen der Oberfläche mit einem Schlüssel oder Schraubenzieher entschieden.

1.2.3.2 Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnoberflächen

Zur systematischen Aufnahme, Auswertung und Bewertung von Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche wurde Anfang der 1990er Jahre in Deutschland die sogenannte Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZEB) etabliert (FGSV, 2018). Ziel der ZEB ist es, bundesweit einheitliche Informationen zum Straßenzustand für das gesamte Fernstraßennetz in einem 4-jährigen Turnus zu erheben, um darauf aufbauend die Verkehrssicherheit und ein hohes Qualitätsniveau im Straßenbau zu gewährleisten, bereitgestellte Mittel zur Erhaltung optimal einzusetzen sowie eine hohe Verfügbarkeit einer leistungs- und zukunftsfähigen Straßeninfrastruktur sicher zu stellen. Die messtechnische Zustandserfassung erfolgt im deutschen Straßennetz mit schnellfahrenden Erfassungssystemen. Mithilfe unterschiedlicher Sensoren werden dabei Daten für straßenzustandsrelevante Teilaspekte erfasst. Aus den Messdaten werden zunächst Indikatoren ermittelt, die mittels Normierungsfunktionen in dimensionslose Zustandswerte überführt werden. Dabei handelt es sich um Noten von 1 bis 5. Im Zuge der Wertsynthese findet eine logische oder gewichtet-additive Verknüpfung der Zustandswerte zu den sogenannten Teilzielwerten (Gebrauchswert und Substanzwert) und abschließend eine logische Verknüpfung zum Gesamtwert statt. Im Zuge der ZEB werden, wie vorstehend beschrieben, im Rahmen sogenannter Teilprojekte (TP1 Ebenheit, TP2 Griffigkeit, TP3 Substanzmerkmale und TP4 Bewertung und standardisierte Auswertung) Kriterien erfasst und bewertet, die den baulichen Zustand und Sicherheitsaspekte charakterisieren. Für das Verbundprojekt ist vor allem das Teilprojekt Ebenheit mit dem Fokus auf den Aspekt Längsebenheit relevant und wird nachfolgend näher beschrieben.

Da Unebenheiten in der Fahrbahnoberfläche das sie überrollende Fahrzeug in Schwingung versetzen, können sie den Lasteintrag in die Straße in Form dynamischer Radlasten verstärken, was wiederum zu einer beschleunigten Schädigung der Fahrbahnoberfläche führt (Ueckermann, et al., 2015). Deshalb ist die Ebenheit einer Straße im Längsprofil ein entscheidendes Qualitätsmerkmal im Straßenbau. Die "Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung" – im folgenden TP Eben abgekürzt – stellen in Deutschland das maßgebliche Regelwerk für die Erfassung und Bewertung der Ebenheit einer Fahrbahnoberfläche dar (FGSV, 2009).

Die Firma LEHMAN+PARTNER betreibt Messfahrzeuge, die seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) jährlich eine zeitbefristete Betriebszulassung für die Teilprojekte TP1a (Längsebenheit), TP1b (Querebenheit) und TP3 (Substanzmerkmale) für den Einsatz im Rahmen der Zustandserfassung und Bewertung (ZEB) gemäß ZTV ZEB-StB (FGSV, 2018) erhalten. Damit qualifizieren sich diese mobilen Messsysteme auch für den Einsatz im Rahmen von Abnahme- und Gewährleistungsverfahren.

1.2.4 Automatisierung und Digitalisierung

1.2.4.1 Führungssysteme im Bereich der Baumaschinensteuerung

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Vorhabens stellt die Optimierung der Führungssysteme im Bereich der Baumaschinensteuerung dar. Bei der Herstellung von Betonfahrbahnen werden eine Vielzahl unterschiedlicher Baumaschinen eingesetzt. Neben Erd- und Schüttgutbearbeitungsmaschinen, Verdichtungsmaschinen, Transport- und Fördermaschinen, Betonmischanlagen kommen auch hoch-automatisierte Fertigungsmaschinen zum Einsatz. Das Automatisierungspotential aller vorgenannten Baumaschinen wird abhängig der Kundenanforderungen mehr oder weniger umfassend in den einzelnen Maschinen umgesetzt. Entsprechend des Stands der Technik werden die folgenden Systeme genutzt:

- I. Führungssysteme: Diese Systeme geben dem Baumaschinenführer nur visuelle Informationen. Das bedeutet, es werden Soll-Ist-Vergleiche zwischen einem Oberflächenmodell und der tatsächlichen Position berechnet und diese dem Baumaschinenführer als Ablage über einen Monitor oder einer Anzeige dargestellt. Diese Ablagen hat der Baumaschinenführer manuell zu korrigieren. Es findet kein automatischer Eingriff in das Hydrauliksystem des Fahrzeuges statt. Die dargestellten Parameter können Höhenabweichungen (1D), Neigungsabweichungen (1D) oder zusätzlich Positionsabweichungen sein, die sich in Kombination mit den zuvor genannten zu einer 3D-Information ergeben.
- II. Semi-automatische Systeme: Hauptsächlich werden diese Systeme zur Höhenregelung des Werkzeugs einer Baumaschine eingesetzt. Das bedeutet der Baumaschinenführer muss das Fahrzeug selbst lenken, die Höhenregelung des Werkzeuges erfolgt jedoch automatisch. Die Stellgrößen berechnen sich aus Soll-Ist-Vergleichen, die bei Führungssystemen nur visuell dargestellt werden. Semi-automatische Systeme finden sich z.B. bei Motorgradern oder Schubraupen.
- III. Voll-automatische 3D Systeme: Bei voll-automatischen 3D Systemen hat der Baumaschinenführer nur noch überwachende Funktion. Für die Positions- und Höhenregelung von Fahrzeug und Werkzeug

wird vollständig in das Hydraulik- und Fahrsystem des Fahrzeugs eingriffen. Die Stellgrößen berechnen sich wiederum aus Soll-Ist-Vergleichen.

1.2.4.2 Digitale Vernetzung der Prozessteilnehmer

Die Forderung einer Verbesserung der Qualität der Fahrbahnen setzt voraus, dass die bei der Fahrbahnherstellung zum Einsatz kommenden Prozesse immer höher automatisiert werden. Dies erfordert, dass die beteiligten Teilprozesse digital miteinander vernetzt sind und die Soll- und Ist-Anforderungen eines jeden Prozessschrittes über eine Leitebene unter den einzelnen Prozessteilschritten ausgetauscht werden. Der Gedanke hinter einer digitalen Vernetzung an sich ist nicht neu. Unter dem Begriff des "Building Information Modeling", abgekürzt als BIM, wird bereits seit 2004 auch im Bauwesen daran geforscht wie z.B. in [Eastmann et al. 2011] beschrieben. Analysen im Bereich des Hochbaus sind beispielsweise in [Dallasega 2018], [Bargstaedt 2015], [Bradley et al. 2016], [Abanda et al. 2017] zu finden. Hierbei wird jedoch zumeist viel Wert auf Planung und Überwachung gelegt. Die Erfassung und Analyse von Qualitätsparametern während des Einbaus wird dabei oft vernachlässigt oder nur hinsichtlich der zeitlichen Abläufe betrachtet.

Neu ist dementsprechend der Ansatz des Vorhabens, dass als übergeordnete Orientierung der Prozessqualität über alle Teilschritte der Prozesskette hinweg die rheologischen Eigenschaften des frischen, ansteifenden und erhärtenden Betons herangezogen werden. Schließlich ist die Rheologie des Betons von der Herstellung über das Fördern, über den Einbau bis hin zur Nachbearbeitung und Nachbehandlung die entscheidende Größe, die einzelnen Prozessschritte zum richtigen Zeitpunkt durchzuführen bzw. den einzelnen Prozessschritt im Sinne einer Gleichförmigkeit des Betons auszusteuern, bzw. die Anforderungen des Fertigers hinsichtlich der Betonkonsistenz mit der Mischanlage kontinuierlich abzugleichen.

1.3 ZIELSETZUNG UND ARBEITSSCHWERPUNKTE

Ziel des abgeschlossenen Vorhabens war es, die sich aus zahlreichen Einzelschritten zusammensetzende Prozesskette der Betonfahrbahnherstellung zu optimieren. Entsprechend sollten die erforderlichen Grundlagen geschaffen werden, künftig ein- und zweilagige Betonfahrbahnen mit deutlich höherer Qualität in der Bauausführung herstellen zu können. Betontechnologische Maßnahmen wurden gesucht, eine bestmögliche Dauerhaftigkeit und damit eine lange Lebensdauer der Betonfahrbahn sicherzustellen. Zudem sind zur Lärmminderung die Fahrbahnoberflächen als Waschbeton oder Beton mit lärmarmer Oberfläche auszubilden. Dabei nimmt die Ebenheit der Fahrbahn einen entscheidenden Einfluss auf den Fahrkomfort und die Dauerhaftigkeit. Dementsprechend sollte der aktuelle Forschungsstand zum bewerteten Längsprofil und zur Erfassung und Bewertung der Ebenheit in 3 D im Vorhaben einbezogen werden.

Die Herstellung von Fahrbahnen aus Beton stellt eine Reihe von technologischen Herausforderungen, die bislang noch nicht hinreichend gelöst werden konnten. Das interdisziplinäre Konsortium aus Bauwirtschaft, Maschinenherstellern und Wissenschaft will daher die gesamte Prozesskette der Herstellung von Betonfahrbahnen auf Verbesserungspotenziale hin durchleuchten und Werkzeuge, Methoden und Maßnahmen identifizieren, mit denen trotz komplexer betontechnologischer, konstruktionsbezogener wie auch maschinen- und anlagentechnischer Herausforderungen die Qualität und Prozesssicherheit des Betonfahrbahnbaus verbessert werden kann. Die Projektgruppe, bestehend aus innovativen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, hat sich in ganzheitlicher Betrachtung den Aspekten der Baustofftransporte, der Logistik, der Betonherstellung, des Betoneinbaus und der nachgelagerten Prozessschritte wie der Herstellung von Oberflächen und Fugen angenommen. Die im Vorhaben beteiligten Baumaschinenhersteller zählen zu den Marktführern im Bereich der Mischanlagentechnik und der Gleitschalungsfertiger. Um die großen wissenschaftlich-technischen Herausforderungen der Betonfahrbahnherstellung anzugehen und zielführende Lösungen herbeizuführen, wurden die Forschungen und Entwicklungen im Labor- und Technikumsmaßstab vorgenommen. Nachfolgend sollen die dabei herausgearbeiteten Werkzeuge und Methoden aufgezeigt werden, die unter realen Größenmaßstabsverhältnissen bei der Herstellung von zwei Demonstrationsstrecken als Betonfahrbahnen eingesetzt, in ihrer Wirkung überprüft und ggf. auf die realmaßstäblichen Bedürfnisse abgestimmt wurden. Das Ergebnis führte letztlich zu einer Prozesskettenoptimierung, die erlaubt, Betonfahrbahndecken zielsicher mit hoher Qualität und Prozesssicherheit herzustellen. Neben der Weiterentwicklung von bautechnologischen Prozessen sind es vor allem baustofftechnologische und verfahrenstechnische Innovationen, die mittels Mess- und Kommunikationstechnik analog den Ansätzen von Industrie 4.0 erlauben, die hintereinander ablaufenden Produktions- und Logistikprozesse digital zu erfassen und zu bewerten.

Das Verbundvorhaben widmete sich im Wesentlichen den nachfolgenden Arbeitsschwerpunkten:

- Interdisziplinäre Analyse der gegenwärtigen Prozesskette Betonfahrbahnherstellung
- Verbesserung der stofflichen Voraussetzungen: Verfügbarkeit, Gleichförmigkeit, prozessintegrierte Merkmalsanalyse der Ausgangsstoffe
- Gleichförmige Herstellung von Fahrbahnbetonen mittels rheologiegestützter Mischprozesse
- Optimierung der Prozesskontrolle durch Digitalisierung und Vernetzung der beteiligten Prozessschritte und Teilnehmer
- Zuverlässige Berücksichtigung der Ausgangsstofffeuchte, Nachdosierung von Ausgangsstoffen zur Konsistenzaussteuerung
- Ganzheitliche Automatisierungskonzepte unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften der Betone: Modellbasierte Simulation und Analyse, Zeitablaufsteuerung der Prozessteilschritt, Mensch-Maschine-Schnittstellen
- Methodische Entwicklung von innovativen Sensorkonzepten zur Erfassung rheologischer Eigenschaften von Fahrbahnbetonen
 - Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Feststellung der Eignung der Betonoberfläche mittels Ultraschallmesssystem (modifiziertes BEUS mit FreshCon)
 - 3D-Scan zur Vermessung der Oberflächenqualität des Waschbetons und ggf. der Nachbearbeitung der Oberfläche
 - Weiterentwicklung vorhandener Messsysteme, um den optimalen Zeitpunkt zum Ausbürsten, Fugenschneiden und Grinden zu ermitteln
- Intelligente Betonfahrbahnherstellung durch digitale Vernetzung
 - Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Feststellung der Eignung der Betonoberfläche mittels Ultraschallmesssystem (modifiziertes BEUS) zum Einsatz der Bürsten für die Herstellung der Waschbetonoberfläche
 - automatische Feststellung der Fugenschneidfähigkeit des Oberbetons durch den Einsatz eines Ultraschallmesssystems (modifiziertes BEUS)
- Patente und Verwertung von im Verbundvorhaben gemeinsam entwickelten Ideen, Erfindungen und Know-How

Somit ergeben sich zur erfolgreichen Umsetzung der im Vorhaben adressierten Entwicklungen folgende Arbeits- und Forschungsfelder:

 die allgemeine Analyse der heute im baupraktischen Einsatz befindlichen Prozesskette der Betonfahrbahnherstellung, um vorhandene Schwachstellen, Problembereiche und Fehlerquellen zu identifizieren, die im Rahmen des Vorhabens durch innovative neue Technologieansätze oder durch Prozessanpassungen und Prozessoptimierungen zu vermeiden sind

- die technologische Weiterentwicklung der Mischtechnik im Sinne einer rheologiegestützten Mischprozessführung, um zielsicher robuste und gleichförmige Frischbetone für den Unterbeton und den Oberbeton der Fahrbahn auch bei den üblichen Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe (leichte Verschiebungen der Korngrößenverteilung, Feuchteschwankungen der Gesteinskörnung, Temperatureinflüsse aus Witterung etc.) bereitstellen zu können. Dies für herkömmliche Waschbetonoberflächen sowie für andere lärmarme Oberflächen
- der Einsatz von Logistikprozessen, um die in ihrer Konsistenz gleichbleibenden Betone beim ein- wie auch zweilagigen Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger bedarfsgerecht ablegen zu können
- die Verbesserung der Grundebenheit des ein- bzw. zweilagigen Fahrbahnbetons mittels am Fertiger zu integrierender Messtechnik, deren Qualität mittels eines hochauflösenden 3D-Laserscanns überprüft werden soll
- die Sicherstellung einer hohen Ebenheit der Unterlage der Betonfahrbahn wie auch der fertigen Oberfläche der Fahrbahndecke im Wellenlängenbereich von ca. 0,5 bis 50 m
- die zuverlässige Herstellung einer Waschbetonoberfläche durch eine auf zerstörungsfreier Messung mittels Ultraschall basierenden Feststellung der erforderlichen Steifigkeit des erstarrten und festigkeitsbildenden Betons für das sichere Bürsten der Fahrbahnoberfläche
- die zuverlässige Herstellung von Oberflächen mit Oberbeton für lärmarme Deckschichten
- die Verbesserung von Grindingoberflächen durch weiterführende prozesstechnologische Optimierungen von Maschinensteuerung und Bestimmung des richtigen Zeitpunktes zum Grinden
- die zuverlässige Identifizierung des geeigneten Festigkeitszustands des Fahrbahnbetons zur zeitgerechten Ausführung des Fugenschnitts in Quer- und Längsrichtung mittels Ultraschall-Messverfahren
- die Integration von Mess- und Kommunikationstechnologien zur digitalen Vernetzung aller Prozessschritte der Herstellung von Betonfahrbahnen und der Zusammenführung und Bewertung aller Prozessdaten
- die Prozessüberwachung zur Realisierung prozessverlaufsabhängiger Einflussnahme zur Optimierung der Einbauqualität des Fahrbahnbetons und zur Sicherstellung einer hohen Dauerhaftigkeit
- die spätere Nutzbarmachung von Zustandsinformationen der Betonfahrbahn (ZEB) im laufenden Betrieb entsprechend der Vorgaben des BVWP 2030
- die Nutzung dieser Systeme auch zur Herstellung von Verkehrsflächen aus Beton außerhalb von Autobahnen

Die digitale Vernetzung aller Prozessschritte, die kontinuierliche Kontrolle und die prozessgestützte Anpassung des Verlaufs eines jeden einzelnen Prozessschrittes erfordert die Integration von elektronischen Komponenten zum Messen und Regeln. Auf diese Weise wird es möglich, die Arbeitsweise der jeweiligen Werkzeuge und Anlagen kontinuierlich zu erfassen und zu bewerten. Entsprechend standen im Vorhaben neben den technologischen Forschungen und Entwicklungen vor allem auch Überlegungen von Industrie 4.0 im Fokus des Verbundvorhabens, um eine bestmögliche Organisation und Herstellung von Betonfahrbahnen zu ermöglichen. Zusammenfassend ergeben sich vier zentrale Arbeitsschwerpunkte, um die Ziele des interdisziplinären Verbundvorhabens zu erreichen.



Die wissenschaftlichen und technischen Arbeiten und Ergebnisse dieser Schwerpunkte werden nachfolgend vorgestellt und diskutiert.

2 ÜBERSICHT ÜBER DIE WESENTLICHEN ARBEITSZIELE DES VORHABENS

Im Verbundforschungsvorhaben wurden im Rahmen eines ersten Bearbeitungsschrittes die in der Praxis immer wieder zu verzeichnenden Prozess- und Handhabungsfehler im Betonstraßenbau analysiert, um nach deren Identifikation und Bewertung neue innovative Werkzeuge und Methoden für die einzelnen Teilschritte der gesamten Prozesskette "Betonfahrbahnherstellung" zu entwickeln. Entsprechend haben die Verbundpartner an unterschiedlichen Betonfahrbahnen, die sich im Bau befunden haben, in interdisziplinärer Zusammenarbeit die Bauabläufe in ihrer Gesamtheit analysieren, um auftretende Problembereiche zu identifizieren und hierfür geeignete Gegenmaßnahmen zu erarbeiten, damit diese sich künftig zielsicher vermeiden lassen. In einem zweiten Arbeitsschritt wurden auf den Erkenntnissen aufbauend Entwicklungen vorangetrieben, um mit Möglichkeiten der Digitalisierung eine bessere Erfassung aller Abläufe der einzelnen Teilschritte der Fahrbahnherstellung vornehmen zu können. In folgenden Arbeiten wurden innovative Methoden und Konzepte entwickelt, erforscht und in der Praxis umgesetzt, um mittels einer intelligenten Vernetzung aller bei der Herstellung von Betonfahrbahnen relevanten Prozessschritte vergleichbar den Überlegungen von Industrie 4.0 die Prozesssicherheit im Vergleich zum heutigen Betonfahrbahnbau deutlich zu steigern. Diese Vorgehensweise stellt auch die Grundlage dar, die Qualität der Herstellung von Betonfahrbahnen zu verbessern. Schließlich folgt der Vorhabenansatz damit der Zielsetzung des BVWP 2030, denn die Sicherstellung hoher Qualitätsstandards bei der Betonfahrbahnherstellung ist künftig nicht nur für den Auftraggeber, sondern auch für die Auftragnehmer von großer Bedeutung, da nur so die hohen Anforderungen nach Verkehrssicherheit, mechanischer Widerstandsfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Lärmminderung und Nutzungsdauer beim Bau, Betrieb und Erhalt von Betonfahrbahnen erfüllt werden können.

2.1 ANALYSE DER PROZESSKETTE ZUR HERSTELLUNG VON BETONFAHRBAHNEN

Im Vorhaben war es das Ziel, alle relevanten Teilschritte der Prozesskette des Fahrbahnbaus auf deren Verbesserungspotenzial hin zu untersuchen. Dabei sollten alle Einflüsse auf den Prozessablauf im Rahmen von Baustellenanalysen eingehend analysiert werden. Es wurde davon ausgegangen, dass mit einer interdisziplinären Untersuchung und Bewertung aller Arbeitsabläufe des Fahrbahnbaus, die maschinen-, material- oder personenbezogenen Einflüsse auf den jeweiligen Prozessschritt aufgezeigt werden können, um auf dieser Kenntnislage aufbauend, Maßnahmen herausgearbeitet werden können, mit denen der qualitätsbeeinflussenden Abweichung entgegengewirkt werden kann. Daher wurden all jene systematischen Einflussgrößen der einzelnen Teilprozesse der Betonfahrbahnherstellung identifiziert, die sich auf die Qualitätssicherstellung nachteilig auswirken.

Neben der eingehenden Analyse aller Bauabläufe der untersuchten Verkehrsflächen, kam den beim Fahrbahnbau zum Einsatz kommenden Baumaschinen, der Betonmischanlage, dem Gleitschalungsfertiger wie auch den Nachbearbeitungsmaschinen eine zentrale Bedeutung zu. Entscheidend war hierbei, dass der beteiligte Partner aus der Bauwirtschaft, das Bauunternehmen Schnorpfeil, die ihr bekannten Problembereiche des Betonfahrbahnbaus aus Sicht des ausführenden Unternehmens aufzeigte. Gleichermaßen zeigten auch die beteiligten Verbundpartner aus der Baumaschinen herstellenden Industrie, so die Fa. Liebherr für die Betonmischanlage und die Fa. Wirtgen für den Gleitschalungsfertiger, die kritischen Schnittstellen der sich folgenden Prozessschritte auf. Ein gleiches offenes Verhalten zeigten auch die Unternehmenspartner für die Nachbearbeitung der Betonfahrbahn, die Fa. OAT, die den Verbundvorhabenpartner die Arbeitsweise beim Fugenschnitt und bei der Oberflächentexturierung aufzeigten und verdeutlichten, wie wichtig die Feststellung des richtigen Zeitpunkts für die Durchführung der jeweiligen Arbeiten ist. Da im Vorfeld bzw. im Nachgang an die Oberflächentexturierung die Ebenheit und Griffigkeit bzw. Lärmminderung zu erfassen und bewerten ist, kam dem Verbundpartner Lehmann und Partner die Aufgabe zu, mit Hilfe eines kinematischen Multisensorsystems die realisierten Fahrbahnen zu analysieren, um den Verbundpartnern die notwendigen Grundlagen bereitzustellen die Einflüsse unbefriedigender und mit Fehlern und Problemen behafteten Teilprozessabläufe anhand des letztlich erzielten finalen Ergebnisses für die gebaute Betonfahrbahn an die Hand zu geben, um die eigentlichen Ursachen des Problems herausarbeiten zu können. Nur mit dieser Grundlage lassen sich prozessabhängige Maßnahmen ableiten und umsetzen, die eine Vermeidung der Probleme sicherstellen.

Daher wurden gemeinsam mit den Baumaschinenherstellern all jene Prozessinformationen identifiziert, die für die qualitätsgesicherte Betonfahrbahnherstellung und für die Prozesskontrolle relevant sind. Soweit die Prozesse nicht ohnehin mit Sensoren ausgestattet sind, mit denen die Teilprozessschritte kontrolliert bzw. gesteuert werden, wurden die Baumaschinen des Bauunternehmens, der Fa. Schnorpfeil, mit entsprechenden Sensoren für das spätere Prozess-Monitoring ausgestattet. Auch die technischen Anlagen und Werkzeuge zur Herstellung der Waschbeton- bzw. Grindingoberflächen sowie die Maschinen zum Schneiden der Fugen wurden mit dem am Vorhaben beteiligten Unternehmen eingehend auf die erreichbare Prozessqualität und auf den möglichen Einbezug der Prozessinformationen hin analysiert. Vielfach werden in den einzelnen Prozess-schritten nur einfache Sensoren bzw. für die Teilprozessbewertung relevante Messsysteme zum Einsatz gebracht, um z.B. die einbaugerechte Eignung der Frischbetonkonsistenz festzustellen oder den richtigen Zeitpunkt des Fugenschnitts zu finden. Werden alle Teilprozesschritte betrachtet, lassen sich beim Betonfahrbahn benennen, die im Verbundvorhaben identifiziert und in ihrer jeweiligen Wirkung auf die zu fertigende Betonfahrbahn bewertet werden sollte.

Im Rahmen der Baustellenanalysen wurde deutlich, dass die Herstellung der Betonfahrbahn mit einer großen Zahl an zumeist subjektiv verursachten Eingriffen und Entscheidungen der auf der Baustelle tätigen Mitarbeiter einhergeht. Dabei hängt die Handlungsentscheidung in besonderer Weise von der Erfahrung und Kompetenz der eingebundenen Mitarbeiter ab. Zwar sind in den Bauunternehmen insbesondere bei den Maschinenführern erfahrene und kompetente Mitarbeitereingebunden, um die Fahrbahn mit der geforderten Qualität herzustellen, doch steigt mit zunehmender Komplexität der Bauaufgabe, der Ausgangsstoffe wie auch des zu verbauenden Betongemisches die Gefahr eines unzureichenden Prozessverlaufs deutlich an. Die Folge wäre eine unzureichende Qualität de Bauleistung, die mit Mängeln behaftet wäre oder die zu einer schlechten Dauerhaftigkeit und damit zu einer nur kurzen Lebenserwartung der Betonfahrbahn führen würde.

Im Verbundvorhaben wurde daher ein Lastenheft erstellt, das auch die Meilensteine des Projektes abbilden konnte. Dabei zeigt das Lastenheft auf, welche Messwerte erfasst und möglichst direkt ausgewertet werden sollte. Zudem musste geklärt werden, welche Parameter für die Gesamtqualität der Baumaßnahme in welchem Maße relevant sind. Das Lastenheft bildete zunächst einen wichtigen Schritt hin zu einer einheitlichen und gesamtheitlichen Datenerfassung, -speicherung und -auswertung.

2.1.1 Lastenheft zur Erfassung der für die Bewertung erforderlichen Messgrößen und Informationen

Um einen Einblick in das ausgearbeitete Lastenheft zu bieten, ist in Abbildung 2-2.1 ein Auszug aus dem Lastenheft zur Definition einiger Größen an der Mischanlage und am Fertiger dargestellt.

				Misch	nanlag	ge							
Kategorie/Überbegriff	Messgröße	Messort		Messmethode		Quant oder qualit	titativ ativ	Zeitstempel		Einbauort oder Chargennumme	r	Einheit des Werte	s Genauigkeit
Zu welchem Bereich gehört der Messwert?	Was wird gemessen?	Wo wird	gemessen?	Wie wird gemesse	en?	Ist der objekt oder subjek	r Wert tiv ktiv?	Ist eine zeitlic Zuordnung de Wertes mögli	che rs ich?	lst eine ortsbezog Zuordnung mögli	gene ch?	In welcher Einheit wird er Wert aufgezeichnet?	Wie genau wird der Wert aufgenommen?
Allgemeine Parameter	Typ der Mischanlage	Mischwe	rk	Festgelegt durch P	ersonal	objekt	tiv	nein		nein		xxx	xxx
	Mischwerkzeug	Mischwe	rk	Festgelegt durch P	ersonal	objekt	tiv	nein		nein		xxx	xxx
	Mischprozessführung	Mischwe	rk	Festgelegt durch P	ersonal	objektiv		nein		nein		xxx	ххх
	Mischbeginn, -ende	Mischwe	rk	Festgelegt durch P	ersonal	objektiv		nein		nein		ххх	ххх
Qualitätsparameter	Gleichmäßigkeit der Betone	Mischwe	rk	Einschätzung des I	Personals	subjek	ktiv	ja, Datum und	d Zeit	ja, Chargennumn	ner	xxx	???
Anlagenmessgrößen	Wirkleisung Mischermotoren Mischer		Wirkleistungsumfo		ormer	objektiv		ja, Datum und Zeit		ja, Chargennummer		kW	[±3kW]
	Drehzahl Mischwellen	Mischer		Drehzahlgeber		objekt	tiv	ja, Datum und Zeit ja, Chargenn		ja, Chargennumn	ner	rpm	[±0,2rpm]
	Drehzahl Motor	Mischer		motorinterner Dre	ehgeber	objekt	tiv	ja, Datum und	d Zeit	ja, Chargennumn	ner	rpm	[±0,2rpm]
	Drehmoment Mischwellen	Mischer		Kraftaufnehmer		objekt	tiv	ja, Datum und	d Zeit	ja, Chargennumn	ner	Nm	[±1kNm]
				Ein	bau								
Kategorie/Überbegriff	Messgröße	Messort	Messmeth	ode	Quantitat	tiv	Zeitste	empel	Einba	uort oder	Einh	eit des Wertes	Genauigkeit
711 welchem Bereich		Wo wird			Ist der W	ert	lst ein	e zeitliche	lst ei	ne ortshezogene	In w	elcher Einheit	Wie genau wird
achört der Messwert?	Was wird gemessen?	gemessen	Wie wird g	emessen?	objektiv o	der .	Zuordr	nung des	Zuora	loung möglich?	wird	l er Wert	der Wert
genore der messwere:		?			subjektiv?		Wertes möglich?		au		aufg	ezeichnet?	aufgenommen?
Allgemeine Parameter	Einbaugerät	Einbau	Festgelegt	durch Personal	objektiv		nein		nein		xxx		xxx
	Einbaubeginn, -ende	Einbau	Festgelegt	durch Personal	objektiv		nein		nein		xxx		xxx
Maschinenparameter	Einbauzeitpunkte	Einbau	Personal tr BPO ein	ägt Ankunft in	objektiv	j	ja, Dat	um und Zeit	ja, Kil	ometermarke	[s]		[±20s]
	Betonrezepturwechsel	Einbau	Erfassung o	durch Personal	objektiv	į	ja, Dat	um und Zeit	ja, Kil	ometermarke	ххх		xxx
Maschinenmessgröße	Wurst vor Abziehbohle	Fertiger	Einschätzu	ng durch Personal	subjektiv	j	ja, Dat	um und Zeit	ja, Kil	ometermarke	xxx		xxx
	Fahrpumpe jeweils linke-/ rechte Seite	Fertiger	CAN		objektiv	i	ja		nein		[mA]	xxx
	Mengenteiler jeweils linke-/ rechte Seite	Fertiger	CAN		objektiv	j	ja		nein		[mA]	xxx
	Schluckvolumen jedes einzelnen Fahrmotors	Fertiger	CAN		objektiv	j	ja		nein		[mA]	xxx
	Fahrgeschwindigkeit jedes einzelnen Kettenschiffs	Fertiger	CAN		objektiv	j	ja		nein		[m/r	min]	xxx

Abbildung 2-1: Auszug aus dem Lastenheft – hier Auszug für die Analyse der Mischanlage und des Fertigers

2.1.2 Interdisziplinär analysierte Baustellen

Um eine umfassende und gesamtheitliche Analyse aller für die Betonbauweise relevanten Prozessschritte der Fahrbahnherstellung vornehmen zu können, wurden von den Verbundpartnern vier Baustellen in gemeinsamer Zusammenarbeit und in interdisziplinärem Austausch eingehend untersucht. Sechs weitere Baustellen wurden in kleineren Gruppen analysiert, um spezifische Problemstellungen tiefgründig mit den im Verbund verfügbaren Expertisen und Erfahrungen zu untersuchen. In Kapitel 14.1 sind als Anhang die Steckbriefe der 10 analysierten Baustellen zusammengestellt, in denen die wichtigsten Informationen zum Bauvorhaben selbst als auch zu den interdisziplinären bzw. disziplinären Zielen der vor Ort tätigen Verbundpartner erläutert. In der nachstehenden Tabelle 1 sind die Bezeichnungen der untersuchten Streckenabschnitte und die im Weiteren verwendeten Abkürzungen zur Übersichtlichkeit und zum besseren Verständnis aufgezeigt.

2.2 Optimierung der Prozessschritte durch innovative Maßnahmen

2.2.1 Prozesssichere Frischbetonherstellung

Die Herstellung von Frischbeton erfolgt mit genau definierten Mengen der Zugabe von Gesteinskörnungen, um ein gleichbleibend homogenes Frischbetongemisch mit konstanter Frischbetonkonsistenz zu erhalten. Nur

wenn die Betonzusammensetzung und die Frischbetonkonsistenz innerhalb tolerierbarer Grenzen erhalten werden können, sind die Voraussetzungen gegeben, einen qualitativ hochwertigen Einbau des Frischbetons mittels Gleitschalungsfertiger mit der geforderten Gleichförmigkeit und Robustheit vornehmen zu können. Doch genau hier liegen wesentliche Probleme des heutigen Betonstraßenbaus.

Tabelle 2.1: Liste aller untersuchten Baustellen nebst weiteren Angaben zu Streckenabschnitt und Bauzeitenfenster sowie der im Weiteren genutzten Abkürzung der Baustelle

Baustellenbezeichnung	Abkürzung Baustelle	von km	bis km	Beginn Betoneinbau	Ende Betoneinbau
A61 AS Dieblich - AS Boppard, FR Speyer	Dieblich I (Di I)	233+450	237+300	25.09.2017	16.10.2017
Flughafen Köln-Wahn, Flugvorfeld, 3. BA	Köln-Wahn I (KW I)			13.06.2018	13.08.2018
A1 AK Wittlich - AS Salmtal, FR Saarbrücken	Wittlich I (Wi I)	111+900	116+000	25.08.2018	14.09.2018
A61 AS Dieblich - AS Boppard, FR Speyer	Dieblich II (Di II)	237+300	241+250	26.09.2018	19.10.2018
Flughafen Köln-Wahn, Flugvorfeld, 4. BA	Köln-Wahn II (KW II)			03.05.2019	18.07.2019
A1 AS Salmtal - AK Wittlich, FR Köln	Wittlich II (Wi II)	116+000	109+000	19.09.2019	28.10.2019
A81 Tunnel Hölzern - Cleversulzbach, FR Würzburg	Cleversulzbach	525+050	527+700	17.08.2020	02.09.2020
A1 AS Wittlich - AS Hasborn, FR Köln	Hasborn	102+900	97+500	04.11.2020	23.12.2020
A61 AS Boppard - AS Waldesch, FR Krefeld	Boppard	245+000	241+250	15.07.2021	16.08.2021

Im Vorhaben sollen daher Erkenntnisse aus der Forschung aufgegriffen werden, um mit einer Optimierung der Mischprozessführung selbst komplex zusammengesetzte Betonrezepturen, wie sie auch mit den heutigen und den künftig im Betonstraßenbau zu erwartenden Betonen Anwendung finden, mit hoher Verlässlichkeit einer geeigneten Einbaubarkeit herstellen zu können. Hierfür bedarf es innovativer Technologieschritte, mit denen sichergestellt werden kann, dass solche Betongemische vollständig aufgeschlossen und homogenisiert werden können. So ist es unerlässlich, die Prozesskette aller zum Mischen von Beton erforderlichen Teilschritte digital zu vernetzen, um die aufeinanderfolgenden Prozessschritte mit Methoden von Industrie 4.0 optimale aufeinander abstimmen zu können. Beginnend von der Zusammenführung und der stofflichen Bewertung (z.B. aktueller Feuchtezustand der Gesteinskornfeuchte) aller Ausgangsstoffe, über die Vorvermischung der festen Mischungskomponenten nach der Beschickung des Mischers, die Zuführung der flüssigen Komponenten und der sich anschließenden Vermischung aller Bestandteile des Betongemisches bis zur Erreichung der für den Betoneinbau mit dem Gleitschalungsfertiger geforderten Frischbetonkonsistenz, umfasst eine große Zahl von Teilschritten, von denen jeder einzelne mit Hilfe moderner Mess- und Regeltechniken zu erfassen und zu bewerten ist, um die Erfüllung der Übergabekriterien vom einen zum anderen Prozessschritt überprüfen zu können. Eine Schlüsselstellung kommt der Anpassung des Energieeintrags an den erzielten Zustand des sich beim Mischen durch den Energieeintrag stets verändernden Zustand des Gemisches zu. So muss es das Ziel sein, den Mischenergieeintrag so zu optimieren, dass das Mischende nach kürzest möglicher Zeit erreicht wird und zugleich gesichert ist, dass der Frischbeton über geforderte Qualität und Gleichförmigkeit verfügt. Eine kurze Mischdauer erlaubt die Ausgabe großer Betonmengen, wie diese bei der Herstellung von Betonfahrbahnen vom Gleitschalungsfertiger auch verbaut werden können. Um aber feststellen zu können, ob der Mischprozess infolge einer hinreichenden Vermischung der Ausgangsstoffe beendet werden kann, bedarf es einer zuverlässigen Bewertung des Mischverlaufes und der über den Mischprozess hinweg sich stets verändernden Frischbetonkonsistenz, die sich mit fortschreitender Mischdauer der Zielkonsistenz nähert. Ggf. bedarf es auch bei komplexer Ausgangssituation einer Nachdosieren von geeigneten Ausgangsstoffkomponenten, um das Frischbetongemisch von einer zu weichen Konsistenz zurück in einen für den Einbau mit dem Fertiger erforderlichen steiferen Zustand zu führen. All diese Ziele und Forderungen erfordern, dass der Mischprozess in all seinen Einzelschritten erfasst und bewertet werden kann und die optimale Mischprozessführung einem ganzheitlichen Mess- und Regelprozess folgt, damit der Frischbeton in einer möglichst kurzen Mischdauer mit den geforderten Frischbetoneigenschaften in stets gleichbleibender Form aus dem Mischer entleert und an das Transportfahrzeug übergeben werden kann.

Neben einer digitalen Vernetzung aller für die jeweiligen Prozessschritte erforderlichen Komponenten bedarf es folglich moderner energieeffizienter Antriebe, um bedarfsgerecht die benötigte Leistungsanforderung bereitstellen zu können. Auf Prozessleitebene ist daher die parallele Simulation der einzelnen Teilprozesse erforderlich, um alle Fertigungsschritte der Prozesskette "Betonherstellung" zu optimieren. Somit können die aktuellen Entwicklungen der Zukunftsoffensive Industrie 4.0 auch auf die Betonherstellung übertragen werden. Mit der Umsetzung des Verbundvorhabens sollte von den Forschungs- und Unternehmenspartner daher eine innovative Weiterentwicklung der mobilen Betonmischanlagen vorgenommen werden, die sich auf die möglichen Verbesserungen der Mischprozessführung mittels der Möglichkeiten der Digitalisierung und der Entwicklung neuartiger Antriebsstränge konzentrierten, um mit den so geschaffenen mess- und regeltechnischen Möglichkeiten eine rheologiegestützte Mischprozessführung zu ermöglichen. Mittels intelligenter Hard- und Softwarelösungen sollte so die Betonherstellung weit über die Automatisierung hinausgehende Individualisierung und Flexibilisierung des Dosierens, Mischens und Entleerens verbessert werden. Mit derartigen Anlagenergänzungen, so die ursprüngliche Zielsetzung, sollten sich die hohen Anforderungen der Betonherstellung von Fahrbahnbetonen hinsichtlich Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Qualität erfüllen lassen.

2.2.2 Prozesssicherer Betoneinbau und Nachbearbeitung

Die heute international dominierende Bauweise für Betonstraßen ist der Einbau mit Gleitschalungsfertigern und der anschließenden Oberflächennachbehandlung. Doch lassen sich selbst mit den heute am Markt verfügbaren technologisch hervorragend ausgestatteten Fertigern selbst bei größter Sorgfalt des Maschinenpersonals und bei Beachtung der bekannten Einbauregeln während des Betriebs von Gleitschalungsfertigern Fehler bei der Bauausführung nicht zuverlässig vermeiden. Bedeutsam ist dies vor allem, wenn es sich dabei um Funktionsfehler handelt, die sich aus der Bauweise und der verwendeten Maschinentechnik systematisch und wiederkehrend ergeben und nur unzureichend durch das Einbaupersonal gemindert werden können. Die Funktionsfehler, die sich auf die Einbauqualität und demzufolge auf die Lebensdauer einer Belagsschicht am stärksten auswirken, sind Entmischungen und Konsistenzschwankungen des Frischbetons. Die Ursache der Konsistenzabweichung kann in der Betonherstellung selbst, in einer Konsistenzänderung während des Transports zum Einbauort oder im Verlust der Einbaukonsistenz beim Vorlegen bis zur Querverteilung vor dem Fertiger begründet liegen. So besteht an heißen Sommertagen die Gefahr, dass der Frischbeton durch Verdunstung oder durch eine Temperaturerhöhung seine Verarbeitbarkeit verliert und somit ein Beton am Fertiger vorliegt, der sich nicht mehr in der geforderten Weise verdichten lässt bzw. der Fertiger nicht die gewünschte Ebenheit erreichen kann. Hingegen werden beim Vorlegen von zu weichen Frischbetonen die erforderlichen Grünstandfestigkeiten nicht erreicht, so dass gleichermaßen die Ebenheitsanforderungen nicht erzielt werden können. Weicht die Konsistenz des Frischbetons über das tolerierbare Maß ab, werden über die Verdichtung und die Ebenheit hinaus auch das Belagsquerprofil und die Oberflächeneigenschaften, wie Griffigkeit und Lärmabsorptionsverhalten, wie auch die dynamische Biegewechselfestigkeit einer Straßenkonstruktion maßgeblich gemindert.

Daher haben sich die Verbundpartner der Aufgabe angenommen, insbesondere den Einflüssen der Rheologie des Betons mit Blick auf die Unzulänglichkeiten und Probleme vom Mischen bis zum Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger anzunehmen und mittels innovativer Technologien und Verfahrensweisen Wege zu erforschen, der nachteiligen Wirkung von Abweichungen durch maschinen-, mess- und regeltechnische Einflussnahmen auch auf den Einbauprozess prozessintegriert entgegenzuwirken.

2.2.3 Qualitätsüberwachung während und nach dem Deckeneinbau

Ziel der Qualitätsüberwachung ist es, Voraussetzungen zu schaffen, mit denen maßgebliche Belagsparameter, wie Belagsbreite und -stärke, Querprofil, Längsebenheit, Verdichtungsgrad und Oberflächenstruktur hinsichtlich Anfangsgriffigkeit und Lärmabsorptionsverhalten nicht erst nach Fertigstellung des Einbauprozesses festgestellt werden können. Hierzu sollte im Verbundvorhaben ein neuer Lösungsansatz zur flächendeckenden Qualitätsüberwachung verfolgt und weiterentwickelt werden, der eine flächendeckende Qualitätskontrolle während des gesamten Bauprozesses erlaubt.

Von zentraler Bedeutung ist dabei, wann der richtige Zeitpunkt gegeben ist, um beispielsweise bei der Herstellung von Waschbetonoberflächen der Arbeitsschritt des Bürstens erfolgen kann. Gleiches gilt auch für die Herstellung der Fugen, die den Fugenschnitt zum exakt geeigneten Zeitpunkt der noch jungen Fahrbahn erfordert. Entsprechend wurde von den Verbundpartnern aus der Wissenschaft und Bauwirtschaft u.a. mittels neuartiger Ultraschallkonzepte an der Entwicklung von Methoden und Verfahren gearbeitet, mit denen das Erstarrungsverhalten bewertet und die frühe Festigkeitsentwicklung des noch jungen grünstandfesten Betons erfasst werden soll. Mit der Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Steifigkeitsentwicklung sollen jene geeigneten Zeitfenster erfasst werden, in denen das Bürsten zur Herstellung der Waschbetonoberfläche zu der erwünschten Oberflächenkontur führt, ohne dass durch ein zu frühes Bürsten Gesteinskörner aus dem noch jungen Beton herausgerissen bzw. infolge eines zu späten Zeitpunkts die Feinmörtelmatrix, die sich an der Oberfläche zwischen den Gesteinskörnern befindet, zur Erzielung der gewünschten Texturierung herausgebürstet werden kann. Aber auch im späteren Verlauf der Festigkeitsentwicklung ist die Feststellung einer ausreichenden Betonfestigkeit oder Betonreife für das schadenfreie Schneiden der Fugen von großer Bedeutung. Schließlich gilt es, Kantenausbrüche an den zu schneidenden Quer- und Längsfugen infolge eines zu frühen Fugenschnitts ebenso zuverlässig zu vermeiden wie eine wilde und unkontrollierbare Rissbildung, wenn der Fugenschnitt erst zu einem zu späten Zeitpunkt erfolgt. Schließlich bilden sich im Gefüge des noch jungen Betons infolge der hydratationsbedingten Formänderungsprozesse (thermische Dehnungen, Schwinden und Kriechen) Zugspannungen, die, sobald diese größer als die infolge Hydratation zu diesem Zeitpunkt erzielte Zugfestigkeit sind, vom Beton nicht aufgenommen werden können und somit eine Rissbildung induzieren. Wurde zu diesem Zeitpunkt der Fugenschnitt noch nicht vorgenommen, der als Sollbruchstelle dient, kommt es zu einem nicht kontrollierbaren Rissverlauf in der Betonfahrbahn, den es nicht zuletzt auch aus Gründen der Fahrsicherheit zu verhindern gilt.

2.2.4 Vermessung der Ebenheit und Beschaffenheit von Fahrbahnoberflächen

Zur Vermessung der Ebenheit und Beschaffung von Fahrbahnoberflächen wurden im Verbundvorhaben verfügbare 3D-Laserscaner zum Einsatz gebracht, mit denen sowohl die Ebenheit des Unterbaus, der Unterbetonlage sowie auch des Oberbetons bereits im Verlauf des Fortschritts der Betonfahrbahnerstellung erfasst, bewertet und dokumentiert werden kann. Dabei wurde von dem beteiligten Unternehmenspartner (LEH-MANN und PARTNER] auf die Erkenntnisse und Ergebnisse des Forschungsberichtes (FE 04.0248/2011/DGB – Integrale Ebenheit, 2015) zurückgegriffen.



Abbildung 2-2: Mögliche Messstellen zur Feststellung der Ebenheit in Bezug auf die Fertigungsschritte des Fahrbahnbaus

In Abbildung 2-2 sind die möglichen Messstellen zur Feststellung der Ebenheit in Bezug auf die Fertigungsschritte: 0 – Boden, 1a – Tragschicht, 1b – Vlies, 2a – Unterbeton unmittelbar nach dem Fertiger, 2b – Unterbeton nach dem Setzen der Dübel und Anker, 3a – Oberbeton unmittelbar nach dem Fertiger, 3b – Oberbeton nach dem Glätten, 3c – Oberbeton nach der abschließenden Bearbeitung (Bürsten oder Grinding), endgültige Höhenlage aufgezeigt. Im Verbundvorhaben stand dabei die Erfassung der Höhenlagen 1a, 3a und 3c im Fokus der Untersuchungen. So dient die Kenntnis der Oberfläche der Tragschicht in der endgültigen Anwendung zur Optimierung der Betonverteilung und der Regelung des Fertigers. Die Ebenheit der Oberfläche 3a dient zur Referenzdatengewinnung für den Grinder und kann als Eingangsgröße für das BIM im Weiteren genutzt werden.

Zur Erfassung der Oberfläche der Tragschicht (1a) wurden hochpräzise Laserscanner eingesetzt. Der Oberbeton an 3a wurde seitens des Unternehmenspartners Wirtgen durch eine Instrumentierung am Gleitschalungsfertiger hinter dem Glättblech realisiert. Zudem konnte die Fahrbahn im Vorfeld der Oberflächennachbearbeitung mittels Befahrung mit dem Messfahrzeug vermessen werden. Dieses wurde zumindest zur Erfassung der fertig texturierten Oberfläche (3c) vom Unternehmenspartner LEHMANN+PARTNER zum Einsatz gebracht.

Im Messfahrzeug findet ein vom Fraunhofer Institut IPM Freiburg entwickelter Laserscanner Einsatz, der es ermöglicht, mit einer hohen Frequenz (800 Hz, 2 Mio. Punkte je Sekunde) bei gleichzeitig hoher Genauigkeit (0,1 bis 0,3 mm) Punkte zu erfassen. Dieser Laserscanner wurde von LEHMANN+PARTNER auf einem Fahrzeug integriert und mit einem Positionierungs- und Orientierungssystem verknüpft, so dass die Erfassung einer hochgenauen 3 D Oberfläche sowohl der Unterlage als auch der Decke möglich ist. Die Genauigkeit ist durch die seit 2012 jährlich erteilte Betriebszulassung der BASt nachgewiesen und kommt seit Jahren zur Erfassung der Ebenheit im Rahmen der ZEB in den Einsatz.

2.2.5 Monitoring und intelligente Vernetzung

Um im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes, die einzelnen Prozessschritte mittels geeigneter Mess-, Informations- und Kommunikationstechnik erfassen und in ihrem Verlauf und dem erzielten Ergebnis des jeweiligen Prozessschrittes bewerten zu können, mussten im Vorhaben die verfügbaren Sensoren und Aktoren mittels einer digitalen Vernetzung zusammengefasst werden. Dabei sind alle in der gesamten Prozesskette installierten Sensoren und Aktoren über die digitale Vernetzung auf einer übergeordneten Prozessebene, die als Leitebene wirkt, aufzuschalten, um die einzelnen Prozessteilschritte kontinuierlich beobachten und in ihrem Prozessverlauf bewerten zu können. Alle sequentiell hintereinander ablaufenden Teilprozesse mussten folglich zur Zielerreichung des jeweiligen Prozesschrittes beurteilt werden, um mit der Erfüllung der für die Übergabe in der nächsten Prozesstufe erforderlichen Zustandsdaten bzw. -merkmalen den nächsten Prozesschritt freizugeben. Auf diese Weise konnten auch die Prozessparameter im laufenden Betrieb der Linienbaustelle zwischen den verschiedenen Prozesstufen ausgetauscht werden, um eine Veränderung des Prozessablaufs rechtzeitig zu erkennen und mit entsprechend geeigneten Anpassungen einer Gefährdung der angestrebten Qualität wirksam entgegenzutreten.

3 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

3.1 PRAKTISCHE UND WISSENSCHAFTLICHE AUSGANGSSITUATION DER BETONHERSTELLUNG

In Deutschland hat sich die Betonbauweise im Straßenbau insbesondere wegen ihrer hohen Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit bewährt [Leykauf et al. 2001], [Breyer et al. 2009], [Pfeifer 2008]. Aus diesem Grund werden im Rahmen von ÖPP-Modellen zunehmend Straßenaufbauten in Betonbauweise ausgeführt [Großmann et al. 2009]. Unabhängig vom Finanzierungsmodell und dem gewählten Oberbau wird der Deckenbeton auf Autobahnen in den meisten Fällen zweischichtig (Ober- und Unterbeton) hergestellt [RDO Beton], [RStO], [ZTV Beton-StB 07]. Alle anderen Flächen werden einschichtig hergestellt. Für die konventionelle Herstellung fanden bisher Straßenbetone Anwendung, die gegenüber Veränderungen innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches im Herstellungs- und Einbauprozess als relativ robust einzuordnen sind [Osterheld et al. 2018], [Springenschmid 1983]. Die stetige Zunahme der Verkehrsbelastung sowie die Absicherung einer hohen Verfügbarkeit und Dauerhaftigkeit haben zur Folge, dass die Anforderungen an den Baustoff "Beton" ständig wachsen [Gailing 1996], [Nischer 1995]. Dem wurde und wird u. a. durch die Weiterentwicklung der Zemente, Betonzusatzmittel und -stoffe Rechnung getragen. Zudem wird zur Begrenzung der CO2-Emissionen zunehmend der Anteil an Portlandzementklinker in Betonen reduziert und es finden alternative Bindemittelsysteme und Betonzusatzstoffe Einsatz in der Betonbauweise, die i.a. zu feinkornreicheren Betongemischen führen [Beckhaus 2002], [Eickschen et al. 1998], [Huber et al. 2005]. Diese Trends gehen jedoch mit einer signifikanten Steigerung der Sensibilität des Stoffsystems "Beton" einher, so dass die Verwendung der heutigen Betongemische eine sehr genaue Dosierung der einzelnen Ausgangsstoffe sowie einen optimalen Aufschluss insbesondere der Feinstoffe sowie eine schnelle und zielsichere Verteilung und Aktivierung der Zusatzmittel erfordern [Chang et al. 2001], [Jezequel et al. 2009]. Entsprechend bedarf es heute einer kontrollierten Mischprozessführung [Williams et al. 1999], [Baumert 2012].

Die Herstellung des Frischbetons im Bereich des Betondeckenbaus erfolgt gegenwärtig bei Großbaustellen im Regelfall mit großen mobilen Mischanlagen in Containerbauweise, die über eine Mischkapazität von bis zu 300 m³/h verfügen. Dabei wird je Mischansatz eine kurze Mischdauer von 45 Sekunden angestrebt. Abbildung 3-1 zeigt eine mobile Mischanlage des bauausführenden Projektpartners.

Sobald der Frischbeton seine Zielkonsistenz erreicht, i.A. wird bei Fahrbahnbetonen eine steife bis plastische Konsistenz gefordert, wird der Mischprozess beendet und der Beton an das unter dem Mischsystem befindliche Transportfahrzeug, meist ein Muldenkipper, übergeben. Anschließend erfolgt der Transport zum Einbauort und der Beton wird dem Gleitschalungsfertiger vorgelegt. Der Gleitschalungsfertiger verteilt den Frischbeton über die gesamte Einbaubreite und baut diesen mit einer hohen Verdichtungsenergie ein, um einen qualitativ hochwertig verdichteten Fahrbahnbeton herzustellen und mit der geforderten Ebenheit auszubilden. Die Einbauqualität hängt maßgeblich von der Gleichförmigkeit der Konsistenz des vorgelegten Frischbetons ab. Entsprechend der großen Ausstoßleistungen ist dies aber eine große Herausforderung.



Abbildung 3-1: Darstellung einer mobilen Betonmischanlage – Ausführung als Doppelwellenmischanlage mit Taschensiloanlage mit 6 Kammern (Quelle: Fa. Schnorpfeil)

Zu berücksichtigen ist ferner, dass logistisch große Mengen der benötigten Gesteinskornfraktionen im Vorfeld der Baumaßnahme im unmittelbaren Umfeld der mobilen Mischanlage zu bevorraten sind, damit große Radlader während der Baumaßnahme die Kammern der Taschensilos nachfüllen können. Die Freilagerung und die Entnahme mit dem Radlader bedingen Unwägbarkeiten, wie schwankende Feuchtegehalte der Kornmaterialien. Grobes Gesteinskorn kann Feuchtegehalt von bis zu drei Massenprozent aufweisen. Feinere Gesteinskornfraktionen können Feuchtegehalte von vier bis acht Massenprozent einnehmen. Der tatsächlich vorherrschende Feuchtegehalt muss bei der Einwaage der Gesteinskornfraktionen erfasst werden, um die Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung bei der Festlegung der Anmachwassermenge zu berücksichtigen. Hierzu finden sich an den Auslässen der Taschensilos elektrische Feuchtemesssonden, mit denen eine stete Erfassung der Feuchte an der vorbeiströmenden Gesteinskörnung vorgenommen wird. Das den Feuchtemesssonden zugrundeliegende elektrische Messprinzip ist sondenspezifisch bzw. herstellerabhängig. Abbildung 3-2 zeigt das von der Fa. Liebherr eingesetzte Feuchtemesssystem, das mit einer kontinuierlichen hochfrequenten Messung den Feuchtegehalt des auslaufenden Korns erfasst. Eine zuverlässige Bestimmung der Kornfeuchte ist Voraussetzung, um die Menge des der Mischung zuzugebenden Anmachwassers bestimmen zu können, damit die aufeinanderfolgenden Chargen an Frischbeton eine stets gleichförmige Konsistenz besitzen können [Garrecht et al. 2012].

Als Mischsystem kommt mobilen Mischanlagen für die Herstellung von Fahrbahnbetonen überwiegend ein Doppelwellenzwangsmischer zum Einsatz (vgl. Abbildung 3-2), wie er in mobilen und stationären Mischanlagen meist zu finden ist.



Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Doppelwellenzwangsmischers (links), Feuchtemesssensor (rechts) (Quelle: Firma Liebherr)

Zur besseren Vermischung und Homogenisierung aller Ausgangsstoffe werden vielfach die Geometrie und Anordnung der Mischwerkzeuge wie auch die Geschwindigkeit der Mischwerkzeuge optimiert bzw. verändert [Beitzel et al. 2003]. Da der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung steten Schwankungen unterworfen ist und die am Korn anhaftende Feuchte die Konsistenz der Betone maßgeblich beeinflusst, kommt der Kornfeuchtebestimmung eine große Bedeutung zu. So zeigt das rechte Bild der Abbildung einen Feuchtemesssensor der Firma Liebherr, der mittels HF-Messtechnik die Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung ermittelt.

3.1.1 Herstellung von Frischbeton mit gleichförmigen Eigenschaften

Die rheologiegestützte Mischprozessführung ist Gegenstand der Forschungen am IWB [5, 6]. An diversen Labormischsystemen werden Werkzeuge, Methoden und Verfahren erprobt, die im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" auf eine realmaßstäbliche mobile Mischanlage übertragen wird, um deren Praxistauglichkeit zu überprüfen. Ziel ist es, trotz des hohen Massendurchsatzes in realen Mischanlagen einen Frischbeton mit stets gleichförmiger Konsistenz herstellen zu können. Dabei stellt die in der Baupraxis gewünschte Begrenzung der Mischzeit eine der größten Herausforderungen dar.

Bei der rheologiegestützten Mischprozessführung wird das sich im Verlauf des Mischens fortwährend verändernde Frischbetonverhalten erfasst, um den Mischverlauf optimal steuern und das Mischende zuverlässig erkennen zu können. Hierzu muss eine maschinentechnische Anpassung des Antriebsstrangs und eine geeignete Betriebsführung der Mischerwelle realisiert werden. Entsprechende Mess- und Regelkonzepte sind zu entwickeln, um gleichförmige und damit robuste Fahrbahnbetone herstellen zu können. Beim Mischen sind folgende Schritte zu beachten:

- a) Dosierung der Ausgangsstoffe, zuverlässige Bestimmung der Kornfeuchte und deren Berücksichtigung bei der Festlegung der Anmachwassermenge,
- b) Feststellung des Mischendes (vollständiger Aufschluss und Homogenisierung des Gemisches),
- c) Minimierung der Mischdauer (vom Mischverlauf abhängiger Betrieb der Mischerwellen),
- d) Überprüfung des Mischendes (Erreichung von Akzeptanzkriterien und kurzes Nachmischen bzw. geringes Nachdosieren).

Entsprechend der steifen bis plastischen Konsistenz von Fahrbahnbetonen erfolgt die Konsistenzbewertung in der Praxis mit dem Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4. Der Feinmörtel wird "erdfeucht" bis "etwas nass" eingestellt. Der Frischbeton wirkt beim Schütten lose bis schollig. Zur Verdichtung werden bei der Fahrbahnherstellung im Gleitschalungsfertiger leistungsstarke elektrischer Rüttler eingesetzt, die vor der Inset-Schalung platziert sind. Mit hochfrequenten Schwingungen zwischen 7.000 und 12.000 U/min wird so eine optimale Verdichtung erreicht, so dass der Beton eine hohe Grünstandfestigkeit aufweist. Bei zu weicher Konsistenz hält der Frischbeton nicht zusammen und die Randzone sackt ein. Bei zu steifer Konsistenz bilden sich hingegen Risse aus und der Beton kann sich ungleichförmig verteilen.

Damit ein gutes Einbauergebnis erzielt wird, müssen nachfolgende Aspekte beachtet werden:

- a) Qualität der Kornfeuchtemessung, zur zuverlässigen Bestimmung der Anmachwassermenge
 - 1. Sicherstellung der Aussagegüte der am Auslass der Gesteinskornsilos installierten Feuchtemesssonden
 - 2. Kalibrierung der Feuchtesonden für die in den Taschensilos eingelagerten Gesteinskornfraktionen, die vielfach fehlt oder unterbleibt
- b) Spielzeitplan des Mischens von der Dosierung bis zum Auslassen des Frischbetons
 - 3. bislang wird Mischdauer i.A. über eine Zeitvorgabe kontrolliert und der Maschinenführer verlängert abhängig seiner Beobachtung und Erfahrung manuell die Mischdauer

4. selbst in modernen Anlagen wird bestenfalls die Stromaufnahme des Antriebs erfasst. Auch hier passt der Maschinenführer den Mischverlauf abhängig seiner visuellen bzw. akustischen Bewertung manuell an.

Die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton ist im FGSV-Merkblatt [FGSV 2004] geregelt. Beim Mischen bestimmen die Art und Menge des zugegebenen Luftporenbildners, die Wechselwirkung des Luftporenbildners mit den anderen Betonausgangsstoffen, die beim Mischen vorherrschenden Witterungsverhältnissen und die eigentliche Mischprozessführung den im Frischbeton erreichten Luftporengehalt. Beim Einbau wirkt sich die Verdichtungsleistung des Gleitschalungsfertigers auf den Luftporengehalt aus, der im Festbeton einen festgelegten Grenzwert nicht unterschreiten darf. Auch nach oben ist der Luftporengehalt begrenzt, um die Tragfähigkeit der Konstruktion nicht zu schwächen. Aktuell dient der absolute Luftporengehalt als Abnahmekriterium. Die Größenverteilung der Mikroluftporen findet derzeit keine Berücksichtigung. Um den Einfluss des Mischens auf den Luftporengehalt herauszuarbeiten, werden im Vorhaben der ideale Zeitpunkt der Zugabe des Luftporenbildners und der Einfluss des Fließmittels (Art und Menge) selbst untersucht. Zur Charakterisierung wird neben dem LP-Topf auch der Super LP-Topf [Bottke 2016] genutzt. Mit einem Air-Void-Analyzer [Linquist et al. 2018] wird die Größenverteilung der Mikroluftporen bestimmt.

3.1.2 Herstellung von Fahrbahnbetonen

Gesteinskörnungen für Betonfahrbahndecken müssen der TL-Gestein-StB [TL Gestein-StB] und Zemente der DIN EN 197-1 genügen. Letztere dürfen erst zwei Stunden nach Wasserzugabe erstarren. Weitere Anforderungen betreffen zulässige Alkaliengehalte, die in TL Beton-StB [TL Beton-StB-07] und in ARS 12/2006 [ARS 2006] angeführt werden. Die zum Einsatz kommenden Luftporenbildner (LP-Mittel) können die Verarbeitbarkeit der Frischbetone verbessern und den Wasseranspruch des Betongemisches verringern. In Fahrbahnbetonen werden auch Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) verwendet. Deren Wirkung hängt von den vorherrschenden Temperaturen ab. Seltener kommen Verzögerer (VZ) zum Einsatz. Da die gleichzeitige Verwendung von Fließmittel und LP-Bildner nachteilig sein kann, sind solche Zusatzmittelkombinationen mit einer Erst-prüfung zu untersuchen.

Einfluss der Packungsdichte auf die Betoneigenschaften

Das Frisch- und Festbetonverhalten wird maßgeblich von der Packungsdichte der festen Ausgangsstoffe bestimmt [Garrecht et. al. 2017]. Die Packungsdichte errechnet sich aus dem Volumen der Feststoffe im Verhältnis zum Gesamtvolumen. Sie wird von der Partikelgrößenverteilung und der Partikelform beeinflusst [de Larrand 1999]. Eine hohe Packungsdichte geht i.A. mit günstigen Frisch- und Festbetoneigenschaften einher [Stengel et al. 2011], da feine Partikel die Hohlräume der gröberen Partikel füllen.

Ist der Anteil grober Partikel hoch, sind große Mengen an feinen Partikeln erforderlich. Bei hohem Feinstoffgehalt nehmen diese eine große spezifische Oberfläche ein und erfordern einen hohen Wasserbedarf. Daher ist eine Kornzusammensetzung anzustreben, mit der sich die erforderliche Wassermenge reduzieren lässt. Die Festigkeitssteigerung wird in [Macht et al. 2007] mit der Porosität des Zementsteins begründet, da sich bei einer optimalen Sieblinie im Mehlkornbereich gleichmäßig verteilte sehr kleine Poren ausbilden. In [Geisenhanslücke 2005] wurde der Einfluss der Partikelform analysiert. Kantige Körnungen bedingen eine niedrigere Packungsdichte und es bilden sich größere Hohlräume, in denen sich Anmachwasser sammelt. An den Partikeloberflächen bildet sich dann kein hinreichender Gleitfilm mehr aus, der die Verarbeitbarkeit beeinträchtigt [Hüttl 2000].



Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Doppelwellenzwangsmischers (links), Feuchtemesssensor (rechts) (Quelle: Firma Liebherr)

Mit Kalksteinmehlen kann eine höhere Packungsdichte als mit Quarzmehl erreicht werden [Stengel et al. 2011]. Es ist bekannt, dass nicht nur die Reaktivität, sondern auch die Granulometrie der Ausgangsstoffe die Entwicklung des Betongefüges und damit die Eigenschaften der Betone im frischen und festen Zustand bestimmen (vgl. Abbildung 3-3).

Betongemische mit optimierter Packungsdichte

Die Sieblinie hat direkten Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Um diese zu optimieren, kommt das modifizierte Andreassen-Modell [Andreasen et al. 1930] zum Einsatz. Hier wird eine Zielsieblinie angesetzt, an die die Sieblinie des Betons zur Steigerung der Packungsdichte anzugleichen ist. Abhängig vom Größt- und Kleinstkorn des Gemisches wird der Siebdurchgang der einzelnen Fraktionen berechnet. Die Ausbildung der Sieblinie wird von einem Verteilungsmodul q beeinflusst. Je niedriger dieser ist, umso höher ist der Feinkornanteil des Gemisches.

Selbstverdichtende Betone sollten einen Verteilungsmodul von 0,22 < q < 0,25 und erdfeuchte Betone einen Verteilungsmodul von 0,35 < q < 0,40 aufweisen [Hüsken et al. 2008]. Bei sinkendem Wasseranspruch steigt die Grünstandfestigkeit. Nach [Reschke et al. 1999] wird die maximale Packungsdichte mit einem Verteilungsmodul von 0,28 erreicht. [Bornemann, 2005] berücksichtigt zudem die Kornform. Hierfür wird der Kornindex, der das Verhältnis von Länge zu Breite der Partikel aufzeigt, betrachtet. Mit steigendem Kornindex wird ein geringerer Verteilungsmodul empfohlen, um mit der höheren Leimmenge die Hohlräume zu füllen.

Mischungsentwicklung mit BétonlabPro

Mit der am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées entwickelten Software BétonlabPro, die verschiedene Modelle zum Compressible Packing Model (CPM) verknüpft, ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen der Mischungszusammensetzung und den Betoneigenschaften abzuleiten [Lédée et al. 2004]. Wesentliches Element der Software ist eine Datenbank, in der wichtige Merkmale der im Gemisch verwendeten Materialien hinterlegt sind, so z.B. der Wasseranspruch, der Fließmittelbedarf und die Verdichtbarkeit. Mit diesen experimentell zu bestimmenden Größen kann dann die Packungsdichte der Kornfraktion berechnet werden. Je höher die Packungsdichte einer Fraktion, umso stärker ist diese in der idealen Mischung vertreten [Macht et al. 2007]. Auch wenn Betonzusatzstoffe bei Fahrbahnbetonen aktuell nicht angerechnet werden können, so können diese in erheblichem Maße dazu beitragen, die Packungsdichte des Fahrbahnbetons zu erhöhen und so die Leistungsfähigkeit im frischen und festen Zustand erheblich zu steigern. Entsprechend der steifen bis plastischen Konsistenz der Fahrbahnbetone wurden im Vorhaben die Kenntnisse zur Verarbeitung erdfeuchter Betone genutzt [Hüsken et al. 2008], [Bornemann 2005].

3.1.3 Rheologiegestützte Mischprozessführung

Grundlagen der rheologiegestützen Mischprozessführung

Feinstoffreiche und wasserarme Betongemische erfordern im Vergleich zu normalen Rüttelbetonen einen höheren Energieeintrag beim Mischen und deutlich längere Mischzeiten [Roussel 2007]. Die Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit allein reicht nicht aus, die für den Aufschluss und die Homogenisierung erforderliche Energiemenge dem Frischbeton zuzuführen. Vielmehr bedarf es eines entsprechend ausgestatteten Antriebstrangs, der mit einem digital vernetzten Sensor-Aktor-Konzept den jeweiligen Mischenergieeintrag auf die maximal vom Frischbeton aufnehmbare Energiemenge anpasst. Mit einer bedarfsgerechten Anpassung von Werkzeuggeschwindigkeit und Motornennmoment soll so der Aufschluss und die Homogenisierung beschleunigt und die Mischdauer minimiert werden. Nicht zuletzt kann das Antriebstrangkonzept auch zur qualitätssichernden Bewertung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons im Mischer genutzt werden. Diese Zusammenhänge konnten von den Verfassern an Labormischsystemen aufgezeigt werden [Garrecht et al. 2012a], [Garrecht et al. 2012b]. Im Verbundvorhaben "Betonfahrbahn 4.0" sollen diese Erkenntnisse auf eine realmaßstäbliche Betonmischanlage übertragen werden.



Abbildung 3-4: Potenziale innovativer Mischprozessführung – Spielzeitplan (links), Feststellung des Mischendes (rechts)

Vom Status Quo zur rheologiegestützten Mischprozessführung

Üblicherweise liegt dem Regelungskonzept von Betonmischanlagen ein Spielzeitplan zugrunde (vgl. linke Darstellung in Abbildung 3-4). In neueren Mischanlagen wird auch der beim Mischen vom Antrieb aufgenommene Strom bzw. die für das Mischen und die Aufrechterhaltung einer bestimmten Werkzeuggeschwindigkeit erforderliche Leistungsanforderung des elektrischen Antriebs erfasst und grafisch visualisiert (rechte Darstellung in Abbildung 3-4). Im Vergleich zum Spielzeitplan, der den Mischvorgang i.A. nach 45 Sekunden abbricht, lässt sich mit einer Erfassung und Bewertung der Leistungsaufnahme des Antriebs das Mischende wesentlich zuverlässiger feststellen. Nähert sich die Antriebsleistung einem unteren Grenzwert, wird von einer vollständigen Durchmischung und Homogenisierung des Frischbetons ausgegangen [Cazaliu et al. 2009]. Das Erreichen dieser Mischprozessphase wird als Stabilisationszeit bezeichnet.

Doch reicht aus Sicht der Verfasser diese Information bei anspruchsvollen Betongemischen, so SCC, HPC, UHPC und Fahrbahnbetonen, nicht aus, um das Mischende zuverlässig feststellen zu können. Vielmehr müssten nach Erreichen der Stabilisationszeit die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons bestimmt werden, wie dies mit einer Charakterisierung des viskoelastischen Verhaltens des Gemisches noch im Mischer zielführend wäre.

3.1.4 Rheologische Charakterisierung des Frischbetons im Mischer

Die an Labormischern entwickelten und erprobten Methoden und Konzepte zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Frischbetonen wurden in eine Patentanmeldung mit der Internationalen Veröffentlichungsnummer WO 2017/103067 A1 [PCT/EP 2016] überführt. Die Erteilung wurde zum 2.10.2019 beschlossen. Der Neuheitswert liegt in der Bestimmung des Losbrechverhaltens des Frischbetons zu dem Zeitpunkt, an dem mit Erreichen der Stabilisationszeit (vgl. Abschnitt 4.2.2) ein erster Hinweis für eine hinreichende Durchmischung aus dem Verlauf der Leistungsaufnahme bzw. des für den Betrieb der Mischwelle erforderlichen Drehmoments vermutet wird.

Als Losbrech-Kraft wird in der Rheologie [Metzger 2016] jene Kraft verstanden, die aufzuwenden ist, um die Haftreibung des bei stehender Mischwelle im Mischer befindlichen Gemisches aus dem Ruhezustand wieder in Bewegung zu setzen. Bei Drehantrieben wird an Stelle von der Losbrech-Kraft vom Losbrech-Drehmoment gesprochen. Um das Losbrech-Verhalten erfassen zu können, müssen Messungen bei sehr niedrigen Drehzahlen möglich sein. Mit dem FU-geregelten Antrieb sind folglich sehr niedrige Drehmomente zu realisieren, um die Fließgrenze des Frischbetons bestimmen zu können. Um möglichst genaue Messdaten zum wirksamen Drehmoment und Drehverhalten der Mischwelle im unteren Drehzahlbereich zu erhalten, ist ein nahezu verlustfreier Antriebsstrang erforderlich, weshalb vom Unternehmenspartner CAVEX ein entsprechendes Schwerlastgetriebe entwickelt wurde.

Um in der Mischstufe I ein rasches Mischende zu erreichen, also mit möglichst kurzer Mischdauer die Stabilisierungszeit zu erreichen, wird vom Mischbeginn an der Energieeintrag maximiert. Ist der Mischenergiebedarf am Mischanfang am höchsten, nimmt das für den Mischvorgang erforderliche Drehmoment mit voranschreitendem Durchmischen und Aufschluss der Betonausgangsstoffe allmählich ab. Wird an den Mischwerkzeugen ein zu hohes Drehmoment bereitgestellt, kann die anstehende Mischenergie vom Gemisch nicht mehr aufgenommen werden. Teile des Gemisches werden um die Mischwerkzeuge herum aus dem Verbund gerissen und nach außen geschleudert. Entsprechend muss die Leistungsbereitstellung angepasst werden, in dem das Motornennmoment ein wenig reduziert wird.

Grundsätzlich lassen sich mit dem Antriebskonzept scherraten- oder schubspannungsgeführte Mischverläufe realisieren. Scherratengeführte Mischprozesse erfolgen über eine Deformationsvorgabe und bieten sich für fließfähige Frischbetongemische an. Bei pastösen bis steifen Betongemischen, so den Fahrbahnbetonen, ist eine Drehmomentvorgabe und damit ein schubspannungsgeführter Mischbetrieb zielführend.

Wird die Stabilisationszeit und damit das Ende der Mischstufe I erreicht, ist zu überprüfen, ob tatsächlich alle Bestandteile des Betongemisches vollständig aufgeschlossen und hinreichend homogenisiert wurden. Entsprechend wird in einem zweiten Schritt das rheologische Verhalten des Gemisches noch im Mischer charakterisiert. Eine solche Untersuchung ist nicht nach jedem Mischansatz bzw. Batch vorzunehmen, sondern sollte stichprobenartig zur Qualitätssicherung erfolgen. Die rheologische Charakterisierung des Gemisches ist aber immer dann zu empfehlen, wenn sich größere Schwankungen in den Eigenschaften der Ausgangsstoffe abzeichnen und Auffälligkeiten bzw. Abweichungen in der ersten Mischstufe bis zum Erreichen der Stabilisationszeit abzeichnen, und eine Nachsteuerung der Frischbetonkonsistenz erforderlich ist.

Zu rheologischen Charakterisierung des viskoelastischen Fließ- bzw. Deformationsverhalten wird die Mischwelle nach Erreichen der Stabilisationszeit zunächst zum Stillstand gebracht. Anschließend wird das Losbrechmoment bestimmt. Nunmehr können weitere Messreihen vorgenommen werden, um im Bereich niedriger Scherraten zwischen zwei und fünf korrespondierende Wertepaare aus Drehmoment und Drehzahl zu bestimmen.

Der Mischverlauf eines Mischansatzes bzw. Batches lässt sich wie folgt zusammen:

- I. Mischphase I bis zum Erreichen der Stabilisationszeit
 - a) Ausgangsstoffe werden in geeigneter Reihung und gemäß Dosieranweisung dem Mischer zugeführt
 - b) Mischwerkzeuge gehen über den für das Mischsystem spezifischen Antriebszug in Betrieb.
 - c) Antriebsleistung und Geschwindigkeit der Mischwerkzeuge wird bereits bei der Zugabe der einzelnen Ausgangsstoffkomponenten durch eine kontinuierliche Erfassung und Bewertung von Drehzahl und Drehmoment in Echtzeit optimiert, um die Motornennleistung maximal auszunutzen und das aus der Stabilisationszeit ableitbare Mischende möglichst schnell zu erreichen.
 - d) Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Motorleistung, die sich gegen Mischende hin durch eine asymptotische Annäherung an einen unteren Grenzwert nähert
 - e) Nähert sich die Motorleistung dem unteren Grenzwert, ist die Stabilisationszeit erreicht und deutet auf ein mögliches Mischende hin.



f) Anhalten der Mischwelle und Ende Mischphase I.

Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Prozesskette "Betonherstellung", wie sie im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" zur Anwendung und erprobt werden soll (Quelle: IWB)

- II. Mischphase II zur rheologischen Charakterisierung des Betongemisches
 - a) Die ruhende Mischwelle wird mit einem linear mit der Zeit ansteigenden Drehmoment beaufschlagt, solange bis sich die Mischwelle gerade zu drehen beginnt. In diesem Moment tritt das Losbrechen ein. Das hierbei wirksame Drehmoment wird als Losbrechmoment bezeichnet.
 - b) Bei gleichbleibendem Drehmoment wird die sich nach einer Stabilisierung einstellende Drehzahl erfasst.
 - c) Nach der Drehzahlstabilisierung wird das Drehmoment sprungartig gesteigert und erneut die Stabilisierung der sich einstellenden Drehzahl abgewartet und erfasst.
 - d) Mehrfache Wiederholung des unter b) aufgezeigten Vorgangs einer stufenweisen Steigerung des Drehmoments und des Abwartens der unter c) aufgezeigten Stabilisierung der sich abhängig des Drehmoments einstellenden Drehzahl. Die jeweilige Erhöhung des Drehmoments bewegt sich stets im Bereich kleiner Scherraten. Das größte aufzubringende Drehmoment sollte 25 % des beim Mischen zur Erzielung einer raschen Vermischung aufgebrachten Drehmoments nicht überschreiten, um die für den Einbau mit dem Gleitschalungsfertigers relevanten Scherraten nicht zu überschreiten.
 - e) Die Zahl der Drehmomentsteigerungen, also der Wiederholungen sollte zwischen 3 und 5 liegen. Grundsätzlich gilt, dass sich mit einer zunehmenden Zahl an Wiederholungen die Qualität der Aussage steigern lässt. Doch nimmt mit der Anzahl an Wiederholungen auch die Verweilzeit des Betons im Mischer zu, weshalb für die Baupraxis eine Begrenzung der Wiederholzahl unabdingbar ist.

Der Verlauf der Mischphase II ist schematisch in Abbildung 3-5 aufgezeigt. In der linken Grafik wird von der ruhenden Mischwelle ausgehend das Drehmoment kontinuierlich in kleinen Schritten angehoben, bis die Mischwelle in Bewegung kommt. Dies kennzeichnet das Losbrechen und das zugehörige Losbrechmoment. Das Losbrechmoment wird so lange konstant gehalten, bis sich die Mischwelle mit einer stabilen Drehzahl bewegt, und das erste Wertepaar aus Drehmoment und Drehzahl gebildet werden kann. Anschließend folgt die erste Anhebung des Drehmoments bei kleiner Scherrate gemäß der Beschreibung unter e). Erneut wird abgewartet, bis sich die Mischwelle bei gleichgehaltenem Drehmoment auf eine konstant bleibende Drehzahl einstellt. In Abbildung 3-5 ist noch eine weitere Anhebung des Drehmoments bei geringer Scherrate aufgezeigt. Neben dem Losbrechmoment liegen folglich drei Wertepaare aus Drehmoment und zugehöriger Drehzahl vor, aus denen die in der rechten Grafik jeweils zugehörigen Scherspannungen und Schergeschwindigkeiten abgeleitet wurden. Die drei Wertepaare lassen sich mit einer ausgleichenden Geraden im Bereich niedriger Scherraten darstellen. Deren Schnittpunkt mit der Ordinate erlaubt eine Aussage zur Fließgrenze. Die Steigung der Geraden entspricht der Viskosität des Frischbetons. Zwar stellen die so ermittelten Werte zu Fließgrenze und Viskosität keine absoluten Messgrößen dar, sie sind aber zumindest für den Mischer und die spezifische Betonzusammensetzung immer gleichbleibend. Somit bietet das Verfahren die Möglichkeit, Frischbetone hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens im Mischer zu bewerten.


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Prozesskette "Betonherstellung", wie sie im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" zur Anwendung und erprobt werden soll (Quelle: IWB)

Liegen die beiden rheologischen Kenngrößen außerhalb des geforderten Akzeptanzbereichs (vgl. Abbildung 3-6), muss der Mischprozess trotz des Erreichens der Stabilisationszeit weitergeführt werden, um eine Konsistenzanpassung herbeizuführen. Neben der Mischzeitverlängerung können auch geeignete Betonzusätze (Zusatzstoffe und/oder Zusatzmittel) nachdosiert werden [Garrecht et al. 2012a], [Wallevik et al. 2011].

Die an Labormischern am IWB umgesetzten und größtenteils an Betonen der Konsistenzklassen F3 bis F6 bzw. an Selbstverdichtenden Betonen im Labormaßstab erprobten Methoden sollten mit Blick auf die Charakterisierung der Betone bereits im Mischsystem auf eine realmaßstäbliche Betonmischanlage übertragen werden. Dieses Ziel konnte am IWB im Meschtechnikum umgesetzt werden.

3.1.5 Spezifische Anforderngen an die Betonherstellung beim Fahrbahnbau

Die heute im Einsatz befindlichen Mischsysteme sind für die Herstellung von Frischbetonen mit sehr niedrigem Wasserbindemittel- bzw. Wasserzementwert und hohen Feinkornanteilen nicht immer geeignet. Um auch für die anspruchsvollen Gemische der Fahrbahnbetone eine vollständige Homogenisierung der Ausgangsstoffe sicherzustellen, sind i.A. deutlich längere Mischzeiten erforderlich. Dabei spielt nicht allein die Mischdauer, sondern auch die Intensität des Energieeintrags beim Mischen eine zentrale Rolle. So lassen sich für die feinkornreichen und wasserarmen Gemische der Fahrbahnbetone mit niedrigen Mischwerkzeuggeschwindigkeiten meist nicht die geforderten Frischbetoneigenschaften zielsicher erreichen. Wird demgegenüber die Werkzeuggeschwindigkeit zur Erreichung einer besseren Mischgüte erhöht, führt dies zu einer guten Durchmischung und Homogenisierung der gröberen Komponenten. Dabei nimmt aber infolge des höheren Energieeintrags die Frischbetontemperatur deutlich zu.



Abbildung 3-7: Hochleistungsbeton mit unzureichender Durchmischung und Granalienbildung bei einem Einbauversuch (links), Detailbild Granalienbildung (rechts)

Da die Wirkung der Fließmittel aber von der Temperatur des Gemisches abhängen kann, verschlechtert sich das Konsistenzverhalten mit zunehmender Frischbetontemperatur. Eine Erhöhung der Werkzeuggeschwindigkeit in Standard-Mischsystemen kann folglich zum frühzeitigen Verlust der geforderten Verarbeitbarkeit der Frischbetone führen. Hinzu kommt, dass sich beim Mischprozess so genannte Granalien- oder Konglomerat-Bildungen ergeben, weil die flüssigen Ausgangsstoffe (Wasser und Zusatzmittel) systembedingt nicht homogen verteilt und/oder aufgeschlossen werden können. Zudem ist aus der Praxis bekannt, dass Schwankungen der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung eine Störung im Mischprozess darstellen kann und sich hierdurch vielfach die geforderte Konsistenz des Frischbetons nicht zielsicher erreichen lässt. Derartige Störungen des Mischprozesses lassen sich mit der konventionellen Mischprozessführung und der hierbei zum Einsatz kommenden Mess-, Steuer- und Regeltechnik nicht vermeiden. Entsprechend werden gegenwärtig neuentwickelte Betone im Straßenbau, z.B. Ultrahochfester Beton (UHPC) und offenporiger Beton (OPB), in der Praxis so gut wie nicht hergestellt. *Abbildung 3-7* exemplarisch die Problematik im Kontext mit einem nicht hinreichend erzielten homogenen Faseraufschluss (Forschungsvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton").

Neben dem wirtschaftlich/technologisch wichtigen Kriterium der Ausstoßleistung rückt jedoch immer mehr die Anforderung an eine gleichbleibende Qualität des Frischbetons in den Vordergrund. So sollte der daraus entstehende Festbeton immer eine gleichbleibende festigkeitsorientierte Packungsdichte aufweisen, um die Streuungen der Festbetoneigenschaften zu minimieren. Dies ist jedoch insofern schwierig, als dass Gesteinskörnungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit natürlichen Schwankungen unterworfen sind. In der Baupraxis mangelt es an geeigneten Kennwerten, mit denen sich die zum Einsatz kommende Gesteinskörnung zuverlässig charakterisieren lässt. Gesucht werden folglich Verfahren und Methoden, mit denen die für das Frischbetonverhalten maßgebende Packungsdichte der Gesteinskörnung zuverlässig erfasst, bewertet und gezielt gesteuert werden kann. So fehlen in der baupraktischen Umsetzung zuverlässige Ansätze, mit denen mittels dreidimensionaler Kornbetrachtungen eine optimale Packungsdichte bei der Frischbetonherstellung sichergestellt werden kann, die eine gleichmäßige Qualität der hochwertigen Betonherstellung sicherstellen würde.

Kommt eine Baumaßnahme zur Umsetzung, werden hohe Qualitätsstandards gefordert, um eine hohe Dauerhaftigkeit der Betondecke sicherzustelle. Dieser hohe Qualitätsstandard beruht aber auf einem sehr hohen Prüfaufwand. So erfolgt nach der Frischbetonherstellung die Übergabe an die Transportfahrzeuge (Muldenkipper, vereinzelt Fahrmischer), die den Frischbeton vom Mischwerk (Mischplatz) zum Einbauort transportieren. Hierbei ist wichtig, dass der Frischbeton in einem bestimmten Zeitfenster und ohne Entmischungen beladen und entladen sowie transportiert wird. Dieser Prozess ist bis heute stark konventionell geprägt, so dass bislang kaum eine Anpassung an die aktuellen Entwicklungen in der Betontechnologie (siehe oben) stattgefunden hat. So wird gemäß Regelwerk die Einhaltung der geforderten Frischbetonkennwerte bis heute i.A. an den Übergabepunkten (Mischwerk/Transportfahrzeug/Einbauort) durch die punktuelle Bestimmung der allgemeinen Frischbetonkennwerten, so dem Verdichtungsmaß, der Frischbetontemperatur, dem Luftporengehalt, etc. punktuell bestimmt.

3.2 EINBAU DES FRISCHEN FAHRBAHNBETONS MIT DEM GLEITSCHALUNGSFERTIGER

Da Betonfahrbahndecken in kurzer Zeit über große Strecken herzustellen sind, hat sich der Einsatz von Gleitschalungsfertigern bewährt. Der eigentliche Herstellungsprozess der Betondecke aus einem einlagigen Beton oder aus einem zweilagigen Ober- und Unterbeton kann in mehrere Einzelprozesse wie: Vorverteilen, Verteilen, Verdichten, Dübel- und Ankersetzen, Glätten und Nachbehandeln unterteilt werden, die durch den Fertiger sowie entsprechende Arbeitsbühnen realisiert werden (siehe Abbildung 3-8, links). Für die Herstellung werden Betone mit einer gleichbleibenden "steifen Konsistenz" verwendet, um zum einen während des Einbauprozesses eine hinreichende Grünstandfestigkeit zu gewährleisten. Zum anderen wird somit sichergestellt, dass die bei der Fertigung eingesetzten Dübel und Anker ihre räumliche Lage beibehalten. Die Forderung nach kurzen Bauzeiten führt zunehmend zu einem Einbau im 24-Stunden-Betrieb, so dass insbesondere die kontinuierliche Belieferung der Einbaugeräte mit Frischbeton gleichbleibender Eigenschaften sichergestellt werden muss. Die durch den Tagesverlauf und/oder stofflich bedingt auftretenden Schwankungen (Temperatur, Witterung, Feuchtigkeit der Gesteinskörnung, Zementtemperatur, etc.) können Veränderungen in den Frischbetoneigenschaften hervorrufen, die ein zeitnahes Erkennen sowie eine kontinuierliche Feinabstimmung zwischen Fertigungs- und Mischprozess erfordern. Beim Fertigungsprozess konnten und können jedoch bis heute immer wieder Probleme festgestellt werden, die im Ergebnis Qualitätsverluste und wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen. Die Abbildung 3-8 (rechts) zeigt exemplarisch eine mangelhafte Ausbildung der Kanten des freien Plattenrandes bei unzureichender Grünstandfestigkeit infolge zu weicher Frischbetonkonsistenz.



Abbildung 3-8:: Einbauprozess Betonfahrbahndecken (links); unzureichende Grünstandfestigkeit beim Einbau (rechts)

Beim Betoneinbau spielt zudem die Reaktion des Frischbetons auf die Verdichtung eine wesentliche Rolle. Grundsätzlich ist hier neben der Verdichtungstechnik und -technologie der Energieeintrag zu berücksichtigen, da eine zu geringe Verdichtung zu einer geringeren Festbetonrohdichte und damit zu einer Abnahme der Festigkeiten führt. Andererseits können ein zu hoher Verdichtungsenergieeintrag und/oder schlecht abgestimmte Innenrüttler zu Entmischungserscheinungen im Frischbeton führen, so dass in der Betondecke u. U. Rüttelgassen entstehen. Derartige Erscheinungen treten nicht selten in der Praxis auf und wirken sich besonders nachteilig auf die Dauerhaftigkeit des Betons aus. Einen weiteren wichtigen Punkt im Herstellungsprozess stellt die zielsichere Erreichung der Ebenheit dar. Diese wird nach der Verdichtung des Betons mittels Rüttler und Fahrbahnschalung durch das Zusammenspiel der Längs- und Querglätter realisiert. Grundvoraussetzung für die Erfüllung der gestellten Ebenheitsanforderungen ist ein vollständiger Deckenschluss unter Beibehaltung der Gefügehomogenität im Beton. Die Einhaltung der geforderten Längs- und Querebenheit wird im Rahmen der Qualitätssicherung durch die ausführende Firma mittels periodisch ausgeführter manueller Linienmessung mit der Richtlatte während des Einbauprozesses überprüft. Im Rahmen der Abnahme erfolgt die kontinuierlich messtechnische Überprüfung, z. B. mittels Planograf.

Für die Herstellung von Betonfahrbahndecken mit herkömmlichen Straßenbetonen in konventioneller Gleitschalungsbauweise sind die kritischen Punkte in der Baupraxis hinreichend bekannt. Aufgrund von Änderungen des Wassergehaltes (i. W. bedingt durch wechselnde Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung) sowie Lufttemperaturschwankungen im Tagesverlauf kann es zu Konsistenzveränderungen kommen, die wesentlichen Einfluss auf die Grünstandfestigkeit nehmen und u.a. zu einer deutlichen Absenkung der Fahrbahnkante und damit zu Einbußen in der Ebenheit bis hin zu Kantenabbrüchen und Verdichtungsunstetigkeiten führen. Die [ZTV-Beton-StB] sehen für die Bauklasse SV momentan eine Überprüfung der Konsistenz einmal täglich und des w/z-Wertes ebenso einmal täglich sowie im Zweifelsfall vor. Die Bestimmung der Betontemperatur ist lediglich alle zwei Stunden bei kritischen Lufttemperaturen(> 25 °C und < 5 °C) vorgeschrieben. Beim Einsatz von Sonderbetonen wie offenporigem Beton oder Hochleistungsbeton stellen sich die genannten Schwachstellen innerhalb der Prozesskette verschärft dar. Losgelöst der letztgenannten Betone können normale Fahrbahnbetone infolge hoher Feinkornanteile und eines geringen w/z-Wertes nur bedingt gleichförmig verbaut werden und Abweichungen von der Soll-Konsistenz lassen sich meist nur über eine Fließmittelzugabe korrigieren. Folglich war es ein vordringliches Ziel des Forschungsvorhabens, den Einbauprozess der ein- und zweilagigen Fahrbahnbetone unter Berücksichtigung der rheologischen Merkmale der Frischbetone zu analysieren. Der Einbauprozess sollte dabei unter Berücksichtigung der zu verwendenden Betone analysiert werden und eine Prioritätenlistung aller Faktoren vorgenommen werden, die Einfluss auf die erzielte Qualität der Fahrbahnoberfläche nehmen. Anschließend sollten im Vorhaben Konzepte entwickelt und erprobt werden, wie auf sich verändernde Frischbetoneigenschaften direkt reagiert und der Einbauprozess verbessert werden kann, um Einbußen der Oberflächenebenheit und der Dauerhaftigkeit der Betonfahrbahn zu vermeiden.

Darüber hinaus sind Prüfverfahren insbesondere zur berührungslosen Verdichtungskontrolle und Ebenheitsmessung zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln, die eine unmittelbare Messung während des Einbaus, z.B. durch eine modulare Ergänzung am Gleitschalungsfertiger, ermöglichen. Zur Erfassung der Fahrbahnebenheit wird seitens der Wirtgen GmbH ein vergleichsweise einfaches und robustes Messsystem entwickelt, mit dem die mittels Glätter erzielte Ebenheit der Fahrbahnoberfläche zur Bewertung des IST-Zustandes der Oberfläche nach abgeschlossenem Einbau und Verdichtung erfasst. Validiert werden kann die zu entwickelnde Oberflächenmesstechnik mit den deutlich genaueren 3D-Scandaten der Systementwicklungen von Lehmann + Partner, die im Rahmen des Vorhabens ergänzend die Oberflächenebenheit mit dem deutlich kostenintensiveren 3D-Scan-Systems erfassen, um auch Aussagen zur Quer- und Längsebenheit geben zu können.

Die von Wirtgen zu entwickelnde Messtechnik zur Ebenheitsbestimmung stellt somit ein wichtiges Element zur flächendeckenden Qualitätsüberwachung im laufenden Einbauprozess dar.

3.3 NACHBEARBEITUNG DER OBERFLÄCHE

Feststellung des geeigneten Zeitpunkts von Nacharbeiten auf der noch jungen Betonfahrbahnoberfläche

Auch die verschiedenen Nachbearbeitungsschritte der Fahrbahnoberfläche hängen in besonderem Maße vom Ansteifen des Grünen Betons und dem Erhärtungsverlauf der jungen Betone ab. Somit kommt auch hier dem rheologischen Verhalten des Frisch- und Festbetons eine entscheidende Bedeutung zu, so dass auch bei den Arbeiten zur Schaffung einer griffigen und lärmarmen Fahrbahnoberfläche all jene innovativen Werkzeuge und Methoden identifiziert und weiterentwickelt werden sollten, mit denen der optimale Zeitpunkt für die Durchführung der jeweiligen Nachbearbeitung festgestellt werden kann, so dass eine unerwünschte Schädigung der Betonfahrbahn und damit Einbußen in der Qualität der Oberfläche ausgeschlossen werden können.

So muss die frisch vom Glätter hergestellte Betonoberfläche der Fahrbahn vor einer Nachbehandlung eine abschließende Oberflächentexturierung erhalten, die eine ausreichende Griffigkeit sowie eine Reduzierung des Reifen-Fahrbahngeräusches sicherstellt. Im Regelfall erfolgt die Ausbildung der Oberfläche durch Ausbürsten des Oberflächenmörtels (Waschbetonbauweise). Um die Erstarrung des Zementleimes im oberflächennahen Bereich zu verzögern, wird dazu im direkten Anschluss an den Einbau des Betons in die Fahrbahn ein Oberflächenverzögerer, oft als Kombinationsmittel aus Verzögerer- und Nachbehandlungsmittel, gleichmäßig aufgesprüht. Der anschließende Ausbürstzeitpunkt wird derzeit in der Praxis durch händisches Ausbürsten eines Testfeldes bestimmt. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei entscheidend von der Erfahrung des Einbaupersonals ab. Daneben kann bei dieser Vorgehensweise auf Unstetigkeiten, die sich z.B. beim Einbau oder bei der Erhärtung des Betons durch unterschiedliche Einbautemperaturen und veränderliche Witterungsverhältnisse ergeben, nur unzureichend reagiert werden. Folglich können sich bei der Wahl eines zu frühen Ausbürstzeitpunktes u.a. Gefügeschädigungen durch das Herausreißen der oberflächennahen Gesteinskörnung einstellen. Wird der Ausbürstzeitpunkt dagegen zu spät gewählt, ist ein vollständiges Entfernen des Zementleimes aufgrund der fortgeschrittenen Hydratation nicht mehr möglich. Zudem wird das Ausbürstergebnis in der Fläche nur visuell überprüft. Eine messtechnische Kontrolle findet nur punktuell statt. Dies hat zur Folge, dass auch Waschbetonflächen ein heterogenes Oberflächenbild hinsichtlich ihrer Texturtiefe aufweisen können. Aufgrund der oben genannten Punkte können Qualitätseinbußen hinsichtlich Griffigkeit und Lärmreduktion auftreten.

Eine Möglichkeit, die genannten kritischen Faktoren zu eliminieren, um den Prozess zu optimieren, stellt u.a. die Entwicklung einer Messtechnik zur Erfassung der Reife des Betons dar, die zuverlässig feststellen kann, ob eine ausreichende Frühfestigkeit des jungen Betons vorliegt, um die Gesteins-körnungen ausreichend im Beton zu binden, so dass die Ausbürstvorrichtung die oberflächennahen Gesteinskörnungen nicht aus dem Betonverbund herausreißen können. Dringender Bedarf besteht folglich an einer vom Bearbeiter unabhängigen Bestimmung des optimalen Ausbürstzeitpunktes für die verwendete Waschbetonrezeptur. Zur messtechnischen Ermittlung des geeigneten Ausbürstzeitpunktes soll im Vorhaben das bereits erläuterte und auf die Fahrbahnbelange zu modifizierende Ultraschallmessverfahren BEUS zum Einsatz gebracht und auf die spezielle Anwendung hin erprobt werden.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Ermittlung des richtigen Zeitpunktes für den Fugenschnitt. Dies betrifft allgemein die Betonbauweise, sowohl mit konventionellen als auch neuartigen Betonen. Auch hier kann es bei einem falsch gewählten Schneidzeitpunkt u.a. zu Gefügeschädigungen im jungen Beton kommen, wodurch die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt werden kann. Derzeit wird i.d.R. vor dem Fugenschneiden die punktuelle Druckfestigkeit des Betons mittels Rückprallhammer ermittelt. Hierbei spielt für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse die Erfahrung des Schneidpersonals eine entscheidende Rolle. Durch die Entwicklung einer Methode erneut aufbauend auf der Ultraschallmessung soll die zeitliche Bestimmung des Zeitpunkts des Fugenschneidens mit einer deutlich besseren Prozesssicherheit vorgenommen werden, indem entsprechend der Ergebnisse jüngerer Forschungsarbeiten mittels Ultraschallmessungen auch über das Erstarrungsende hinaus der richtige Zeitpunkt des Ausbürstens des Feinmörtels hinaus die Verdichtens und Glättens von Sichtbetonoberflächen mit dem Flügelglätter in der industriellen Fertigung großformatiger Betonbauteilen ermitteln zu können. Bei offenporigem Beton ist die herkömmliche Schneidtechnik jedoch nicht anwendbar, da beim Schneiden ein übermäßiges Ausbrechen von Gesteinskörnungen auftritt. Dieses kann ursächlich auf das spezielle Betongefüge zurückgeführt werden.

Potenziale des Einsatzes von Ultraschallmessverfahren

Die Bestimmung von Materialparametern an Frisch- und Festbeton kann mittels Ultraschallmessungen durchgeführt werden. Das Verfahren ist wissenschaftlich und technisch anerkannt [Reinhardt et al. 2005], [DIN EN 12504], [DGZfP B4]. Es sind verschiedene Ultraschallmessgeräte für Frischbeton kommerziell erhältlich, die die sich verändernden Eigenschaften mit unterschiedlichen Messprinzipien erfassen. Die Messgeräte "BEUS" bzw. "Solidcheck" basieren auf der Änderung der akustischen Impedanz während des Erstarrens und Erhärtens. Der Frischbeton wird dafür in ein Prüfgefäß eingefüllt, an dessen Boden sich ein Ultraschall-Kompressionswellensensor befindet, der über eine geeignete Vorlaufstrecke (PMMA) an den Frischbeton angekoppelt ist. Das System arbeitet im Reflexionsschallverfahren mit einem Sende- bzw. Empfangs-Prüfkopf. Der Sensor schickt dazu einen Ultraschallimpuls aus, der Übergang zwischen Vorlaufstrecke und Frischbeton aufgrund der sprunghaften Änderung des Wellenwiderstands reflektiert wird. Während der Erstarrung und Erhärtung ändert sich die akustische Impedanz, was zu einer Änderung der zurückgeworfenen Wellenamplitude führt. Sie berechnet sich anhand der Materialkennwerte zu

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

mit der akustischen Impedanz

$$Z = \rho \cdot v$$

Durch die Wahl eines geeigneten Materials für die Vorlaufstrecke kann das Erstarrungsende anhand des Reflexionsminimums zuverlässig bestimmt werden.

Das Messgerät "FreshCon" nutzt die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten von Kompressions- und Scherwelle in Frischbeton zur Bestimmung der dynamischen Elastizitätswerte. In zwei Prüfgefäße wird dazu der betrachtete Frischbeton eingefüllt und im Transmissionsverfahren mit beiden Wellenarten durchschallt. Anhand den automatisch ermittelten Wellenlaufzeiten und die durch die Prüfgefäße festgelegte Laufstrecke lassen sich die Wellengeschwindigkeiten fortlaufend berechnen. Aus diesen lassen sich zum einen Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende ableiten, zum anderen aber auch die dynamischen Elastizitätswerte wie folgt berechnen:

$$\sigma_{dyn} = \frac{\frac{1}{2} \cdot v_P^2 - v_S^2}{v_P^2 - v_S^2}$$
$$E_{dyn} = (2 + 2\sigma_{dyn}) \cdot v_S^2 \varrho$$

Die beiden in "Beus" bzw. "SolidCheck" und in "FreshCon" eingesetzten Verfahren bildeten die Basis für die Entwicklung eines für die Erfassung des geeigneten Zeitpunkts für das Bürsten zur Herstellung einer Waschbetonoberfläche sowie des Zeitpunkts für den Fugenschnitt geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahrens in "Betonfahrbahn 4.0"

Folglich kommt der prozesssicheren Nachbearbeitung der Fahrbahnoberfläche in besonderem Maße eine zuverlässige Bewertung des Ansteifens des grünstandfesten Betons und dem Erhärtungsverlauf der jungen Betone zu. Wie bei der Betonherstellung wird die Nachbearbeitung gleichermaßen vom rheologischen Verhalten des nunmehr ansteifenden bzw. erhärtenden Frisch- und Festbetons bestimmt. Die qualitätssichere Nachbearbeitung des noch jungen Fahrbahnbetons ist zur Sicherstellung einer griffigen und lärmarmen Fahrbahnoberfläche von essentieller Bedeutung, weshalb im Verbundvorhaben auch innovativen Werkzeuge und Methoden identifiziert und weiterentwickelt werden sollten, mit denen der optimale Zeitpunkt für die Durchführung der jeweiligen Nachbearbeitung zuverlässig festgestellt werden kann, um eine unerwünschte Schädigung und damit Einbußen an der Qualität der Oberfläche auszuschließen.

Erfordernis von lärmmindernden Fahrbahnoberflächen

Es ist bekannt, dass die frisch vom Glätter hergestellte Betonoberfläche eine abschließende Oberflächentexturierung erhalten muss, mit der eine ausreichende Griffigkeit sowie eine Reduzierung des Reifen-Fahrbahngeräusches sichergestellt werden soll. Da etwa 16 % der Bevölkerung in Deutschland infolge gesundheitsgefährdender Lärmpegel durch den Straßenverkehr gestört, belästigt und teils gesundheitlich beeinträchtigt [UBA 2013; UBA 2000] sind, kommt folglich der Lärmminderung eine zentrale Bedeutung zu. Bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von über 30 km/h ist das Reifen-Fahrbahngeräusch die dominierende Geräuschquelle. Entsprechend werden lärmmindernde Fahrbahnbeläge gefordert. Um diesen Anforderungen nachzukommen, werden auf Straßen außerorts offenporige Asphaltbeläge (OPA) in ein- oder zweischichtiger Ausführung, lärmarme Gussasphalte (MA LA), Splittmastixasphalte (SMA), Asphaltbeton (AC) und Waschbeton (WB) zum Einsatz gebracht [UBA 2014].

Im Betonfahrbahnbau kommt als lärmmindernde Oberflächentexturierung die Waschbetonbauweise i.d.R. zur Anwendung. In jüngerer Zeit findet in Erprobungsstrecken auch in zunehmender Weise das Grinding-Verfahren Einsatz. Beide Verfahren zur Texturierung sind in Abbildung 3-9 in Hinsicht auf die erforderliche Maschinentechnik sowie die Oberflächentextur einander gegenübergestellt.





Abbildung 3-9: Bildmaterial aus [Skarabis 2020] zur Wachbetonbauweise und zum Grindingverfahren links - Ausbürsten des Oberflächenmörtels (oben), Waschbetontextur (unten) rechts - Grindingmaschine (oben), Grindingtextur (unten)

Waschbetonbauweise

Die Waschbetonbauweise stellt bislang bei Betonfahrbahnen den Regelfall der Ausbildung einer lärmmindernden Fahrbahnoberfläche in der Betonbauweise dar. Hierbei wird durch Ausbürsten des Oberflächenmörtels die Lärmminderung erzielt [BE 341 1994], [Stöckert 2012], [Nelson et al. 1994]. Seit 2006 ist die Waschbetontextur in Deutschland mit einem D_{stro}-Wert von -2 dB(A) als lärmarme Regelbauweise für Verkehrsflächen aus Beton eingeführt. Dabei handelt es sich um eine technisch anspruchsvolle Oberflächentexturierung. Bezüglich der Ausführungsqualität sind für das Gelingen einer Waschbetontextur folgende Parameter von großer Bedeutung: - Anteil, Kornform und Bruchflächigkeit der gebrochenen Gesteinskörnungen

- Kornzusammensetzung bzw. Sieblinie für eine hohe Profilspitzenzahl an der Oberfläche
- Witterung und Temperatur beim Betoneinbau bzw. beim Entfernen des Oberflächenmörtels
- Dicke und Qualität des Oberflächenmörtels
- Typ des Oberflächenverzögerers
- Ausbürstzeitpunkt und Nachbehandlung vor und nach dem Ausbürsten.

Dabei wir die Textur derart hergestellt, dass zur Verzögerung des Erstarrens und der Anfangserhärtung des Zementleims auf die geglättete Betonoberfläche ein dünner Film eines Oberflächenverzögerers gleichmäßig aufgesprüht und mit einer Folie abgedeckt wird. Nach einer ausreichenden Erhärtung, die eine Befahrbarkeit der Fahrbahnoberfläche ermöglicht, wird das Gerüst der groben Gesteinskörnungen an der Oberfläche durch trockenes oder nasses Ausbürsten freigelegt. Die Texturtiefe soll zwischen 0,6 und 1,1 mm liegen.

Die Betonoberfläche muss sofort nach der Herstellung gegen Austrocknen geschützt werden. Gebräuchlich ist das Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels, das den TL NBM-StB entsprechen muss. Die Dauer der Nachbehandlung hängt von der Witterung und der Festigkeitsentwicklung des Betons ab. Zu ergänzen ist, dass das Ausbürsten des Oberflächenmörtels mit freigelegter Gesteinskörnung zudem den Frost-Tausalz-Widerstand der Oberfläche verbessert [Wenzl 2007].

Eine Schlüsselrolle kommt der Festlegung des geeigneten Ausbürstzeitpunkts zu, der derzeit in der Praxis durch händisches Ausbürsten eines Testfeldes bestimmt wird. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei entscheidend von der Erfahrung des Einbaupersonals ab. Daneben kann bei dieser Vorgehensweise auf Unstetigkeiten, die sich z.B. beim Einbau oder bei der Erhärtung des Betons durch unterschiedliche Einbautemperaturen und veränderliche Witterungsverhältnisse ergeben, nur unzureichend reagiert werden. Folglich können sich bei der Wahl eines zu frühen Ausbürstzeitpunktes u.a. Gefügeschädigungen durch das Herausreißen der oberflächennahen Gesteinskörnung einstellen. Wird der Ausbürstzeitpunkt dagegen zu spät gewählt, ist ein vollständiges Entfernen des Zementleimes aufgrund der fortgeschrittenen Hydratation nicht mehr möglich. Zudem wird das Ausbürstergebnis in der Fläche nur visuell überprüft. Eine messtechnische Kontrolle findet nur punktuell statt. Dies hat zur Folge, dass auch Waschbetonflächen ein heterogenes Oberflächenbild hinsichtlich ihrer Texturtiefe aufweisen können. Aufgrund der oben genannten Punkte können Qualitätseinbußen hinsichtlich Griffigkeit und Lärmreduktion auftreten.

Eine Möglichkeit, die genannten kritischen Faktoren zu eliminieren, um den Prozess zu optimieren, stellt u.a. die Entwicklung einer Messtechnik zur Erfassung der Reife des Betons dar, die zuverlässig feststellen kann, ob eine ausreichende Frühfestigkeit des jungen Betons vorliegt, um die Gesteins-körnungen ausreichend im Beton zu binden, so dass die Ausbürstvorrichtung die oberflächennahen Gesteinskörnungen nicht aus dem Betonverbund herausreißen können. Dringender Bedarf besteht folglich an einer vom Bearbeiter unabhängigen

Bestimmung des optimalen Ausbürstzeitpunktes für die verwendete Waschbetonrezeptur. Zur messtechnischen Ermittlung des geeigneten Ausbürstzeitpunktes wurde im Verbundvorhaben die zuvor aufgezeigten Ultraschallverfahren hinsichtlich einer Einsetzbarkeit beim Fahrbahnbau erprobt und weiterentwickelt.

Fugenschnitt

Auch für die Bestimmung des richtigen Zeitpunktes für den Fugenschnitt kann das im Verbundvorhaben weiterentwickelte und erprobte Ultraschallmessverfahren zielführend eingesetzt werden. Schließlich führt auch hier ein falsch gewählter Schnittzeitpunkt zu Gefügeschädigungen im jungen Beton kommen, wodurch die Gebrauchstauglichkeit der Fahrbahn beeinträchtigt werden kann. Derzeit wird i.d.R. vor dem Fugenschneiden die punktuelle Druckfestigkeit des Betons mittels Rückprallhammer ermittelt. Hierbei spielt für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse die Erfahrung des Schneidpersonals eine entscheidende Rolle. Durch die Entwicklung einer Methode erneut aufbauend auf der Ultraschallmessung soll die zeitliche Bestimmung des Zeitpunkts des Fugenschneidens mit einer deutlich besseren Prozesssicherheit vorgenommen werden, indem entsprechend der Ergebnisse jüngerer Forschungsarbeiten mittels Ultraschallmessungen auch über das Erstarrungsende hinaus der richtige Zeitpunkt des Ausbürstens des Feinmörtels hinaus die Festigkeitsentwicklung des jungen Fahrbahnbetons so zuverlässig charakterisiert werden muss, dass sich die für die Ausführung des Fugenschnitts erforderliche Festigkeit der Betonfahrbahn aus den Ultraschallmessignalen zuverlässig abgeleitet werden kann.

Grinding-Verfahren

Eine noch junge aber richtungsweisende Lösung zur Verbesserung der Lärmminderung von Fahrbahnflächen aus Beton bietet das Grinding-Verfahren. Hier werden durch eine gezielte, maßgenaue Bearbeitung der Oberfläche am erhärteten Beton sehr gute Ergebnisse realisiert, wobei mit einer optimalen Textur eine Lärmminderung in der Größenordnung von -5 dB(A) erreicht werden kann. Somit bietet das neue, innovative Verfahren eine gute Alternative zur bisherigen Texturierung des Frischbetons in der Waschbetonbauweise.

Bisher wurde das Grinding-Verfahren fast ausschließlich für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen sowie für die Beseitigung von Unebenheiten angewendet [Riffel 2012]. Auf diesen ertüchtigten Flächen wurden aber schon bald die weiteren Vorzüge dieses Schleifverfahrens festgestellt, die in zurückliegenden Jahren eingehend messtechnisch hinsichtlich des akustischen Wirkens betrachtet wurden.

Beim Grinding-Verfahren kommt ein materialabtragendes Schleifverfahren zum Einsatz. Die mit dem Schleifen erzielte Kontur wird in Längsrichtung der Fahrbahn ausgeführt. Entscheidend für die einzusetzende Schleiftechnik ist, dass der eigentliche Schleifprozess derart schonend erfolgt, dass die Qualität der Betonoberfläche nicht negativ beeinflusst wird. Mit definierter Schleiftiefe, Rillen- und Stegbreite können gezielt Texturen mit sehr guten Lärmminderungs- und Griffigkeitseigenschaften hergestellt werden [VIF]. Des Weiteren werden beim Schleifen alle Unebenheiten aus dem Decken-Fertigungsprozess beseitigt, so dass eine Fahrbahnoberfläche mit sehr guter Längs- und Querebenheit hergestellt werden kann, was sich natürlich auch sehr günstig auf das Rollgeräusch, den Fahrkomfort und die Fahrdynamik auswirkt.

Die maßgenau hergestellte Rillenstruktur weist neben einer lärmtechnisch günstigen Rautiefe von circa 0,9 bis 1,1 mm auch sehr gute Dränageeigenschaften auf. Die Dauerhaftigkeit der Grinding-Textur ist maßgeblich von der Qualität des Oberflächenmörtels sowie von der Festigkeit bzw. Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnungen abhängig. Die Bearbeitung der Oberfläche erfolgt mit speziellen Diamantschleifscheiben, die auf einer rotierenden Schleifwelle mit Distanzscheiben in einem bestimmten Abstand nebeneinander angeordnet sind. Der Abstand und die Breite der Diamantscheiben bestimmen die spätere Textur der zu bearbeitenden Fahrbahnoberfläche.

Zum Zeitpunkt der Ausführung sollte der Beton eine Druckfestigkeit von > 20 MPa aufweisen, so dass die Stege sauber und gleichmäßig brechen.

3.4 EBENHEITSERFASSUNG UND -BEWERTUNG

Zur Erfassung der Ebenheitsparameter beim Betonstraßenbau wurden seitens L+P zwei kinematische Erfassungssysteme eingesetzt: das Fahrzeug S.T.I.E.R 2 und das Fahrzeug I.R.I.S. 13. Nachfolgend werden die Modellnummern zum Zwecke einer besseren Lesbarkeit weggelassen. Die Messfahrzeuge S.T.I.E.R und I.R.I.S unterscheiden sich nicht in Bezug auf ihren Aufbau und Kernkomponenten, wie das Positionierungssystem. Während S.T.I.E.R hinsichtlich der verbauten Sensoren für die speziellen Erfordernisse der netzweiten Zustandserfassung und -bewertung von Straßen sowie Abnahme- und Gewährleistungsverfahren konfiguriert wurde, ist I.R.I.S für hochgenaue dreidimensionale Mobile Mapping Anwendungen mit zwei Laserscannermodellen konzipiert. Beide Systeme werden nachfolgend im Detail beschrieben.

Das kinematische Multisensorsystem S.T.I.E.R, ist ein von L+P entwickeltes und betriebenes Messsystem zur Erfassung der Längs- und Querebenheit, der Textur, der dreidimensionalen Oberfläche sowie des Oberflächenbilds von Straßen und Verkehrsflächen. Die Kernkomponenten von S.T.I.E.R sind ein inertiales Positionierungssystem, Laserdistanzsensoren zur Messung eines Höhenlängsprofils in der rechten Rollspur (HRM), ein Oberflächen-LiDAR-System sowie verschiedene Kamerasysteme zur Erfassung der Fahrzeugumgebung und der Fahrbahnoberfläche (siehe Abbildung 3-10). Seit dem Jahr 2012 hat das Messsystem der ersten und zweiten Baureihe kontinuierlich eine zeitbefristete Betriebszulassung der BASt und wird seit Jahren zuverlässig im Rahmen der ZEB-Messkampagnen auf Bundes- und Länderebene eingesetzt. Auch das neueste S.T.I.E.R Modell der aktuell dritten Generation wurde 2020 für den ZEB-Einsatz zugelassen. Die für das Verbundprojekt relevanten Datenquellen sind zum einen das inertiale Positionierungssystem und zum anderen der Oberflächenlaserscanner.



Abbildung 3-10: Mobile Laserscanning System S.T.I.E.R 3 der Firma L+P. Zwischen dem rechten Vorder- und Hinterrad befinden sich 4 nach dem HRM-Prinzip angeordnete Einzellaser zur Erfassung eines Höhenlängsprofils in der rechten Rollspur. Am Heck sind ein Oberflächenlaserscanner sowie eine hochauflösende Oberflächenzeilenkamera samt zugehöriger Beleuchtungseinheit montiert.

Zu den relevanten Kernkomponenten zählt das Positionierungssystem vom Typ Applanix POS LV 420. Dabei handelt es sich um ein integriertes System aus globalem Navigationssatellitensystem (GNSS), inertialer Messeinheit (IMU) und einem Wegstreckenmesser. Durch die Kombination dieser Bestandteile ist sowohl die Bestimmung der absoluten Position als auch der relativen Positionsänderung inklusive aller Raumwinkel und Beschleunigungen möglich. Das GNSS dient dabei der Positionierung des Systems im globalen Raumbezug. Die IMU nutzt zur Bestimmung der Winkeländerungen und der relativen Orientierung einen faseroptischen Kreisel mit drei Beschleunigungssensoren für jede Bewegungsrichtung. Mit einer Frequenz von 200 Hz werden die Beschleunigungen und Winkeländerungen für alle drei Raumachsen aufgezeichnet. Die eingesetzte IMU besitzt einen Winkelfehler von weniger als 0.03 Grad bei einminütigen GNSS Ausfall, sodass auch bei schlechten GNSS-Bedingungen eine Positionsbestimmung mit einer geringen sensorspezifischen Drift fortgeführt werden kann. Zusätzlich ist zur Erfassung des zurückgelegten Weges ein Wegstreckenmesser an einem Rad montiert. Je Radumdrehung werden etwa 2000 Pulse aufgezeichnet. Die Auflösung beträgt somit, je nach Radumfang, circa 0.5 mm je Puls. Aus den Rohdaten aller im Fahrzeug verbauten Sensoren wird während der Messung mit Hilfe eines Kalman-Filters eine Realtime-Trajektorie berechnet, welche die Position und alle Raumwinkel auf Basis der Rohdaten enthält. Die Ermittlung der finalen Positionen und Winkel erfolgt mit Hilfe der proprietären Software POSPac MMS unter Nutzung externer Korrekturdaten (Landau, et al., 2002). Im Ergebnis der Berechnung liegt die Fahrzeugtrajektorie als Punktfolge mit allen relevanten Informationen, wie beispielsweise Zeitstempel, Beschleunigungen, Raumwinkel und Koordinaten vor. Die absolute Genauigkeit der Trajektorie nach Post-Processing der Daten des inertialen Positionierungssystems ist bei GNSS-Abdeckung mit 20mm für die Lage- und 50mm für die Höhenkomponente spezifiziert (Applanix, 2019).

Bei dem auf die Fahrbahnoberfläche ausgerichteten Laserscanner handelt es sich um einen Pavement Profile Scanner Plus (PPS) des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik (Reiterer, et al., 2013). Der PPS erreicht eine Messfrequenz von 1 MHz und erfasst circa 800 Profile je Sekunde. Die Messgenauigkeit des PPS liegt, gemittelt über ein 10 cm × 10 cm großes Oberflächenelement, im Submillimeterbereich. Um diese extrem hohe Präzision bei großen Messgeschwindigkeiten und gleichzeitiger Augensicherheit zu gewährleisten, nutzt der PPS als Messprinzip das Phasenvergleichsverfahren und eine Wellenlänge im nahen Infrarotbereich. Weitere technische Spezifikationen sind bei (Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM, 2019) zu finden.

Über die zeitliche Synchronisierung der Messungen des Positionierungssystems und des Laserscanners entsteht das grundlegende Datenprodukt für die weiterführenden Analysen in Form von dichten 3D-Punktwolken. Auf einer Erfassungsbreite von ca. 4.2 m nimmt der PPS quer zur Fahrtrichtung etwa alle 4mm eine Oberflächenmessung vor. Bei einer Befahrungsgeschwindigkeit von 80 km/h werden alle 28mm derartige Scanprofile erzeugt. Eine 4m*5m große Betonplatte wird demnach mit ungefähr 0.2 Millionen Messpunkten flächenhaft abgetastet. Eine höhere Messpunktdichte in Fahrtrichtung kann durch Reduktion der Befahrungsgeschwindigkeit erreicht werden. Aus den beschriebenen, unorganisierten 3D-Punktwolken wird im Zuge der Datenprozessierung ein regelmäßiges, an der Trajektorie ausgerichtetes Messpunktgitter erzeugt (3D-Oberflächenmodell), wie es auch im Automotive-Bereich für Simulationszwecke Einsatz findet (Tyre simulation challanges, 2008). Für Ebenheitsanalysen im Kontext der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen ist eine Rasterweite von 0.1m in Längs- und Querrichtung maßgeblich (FGSV, 2009). Aufgrund der geordneten Matrixstruktur des 3D-Oberflächenmodells können Längs- und Querprofile mit absoluten Höhenwerten effizient an beliebigen Stellen extrahiert und einer Ebenheitsanalyse zugeführt werden.



Abbildung 3-11: Mobile Laserscanning System I.R.I.S der Firma L+P. Im Projektkontext sind vor allem der hinten am Dachträger mittig montierte Oberflächenscanner PPS sowie der rechts daneben montierte 350° Laserscanner CPS von Bedeutung.

Das zweite im Verbundvorhaben verwendete Mobile Mapping System ist I.R.I.S, welches im Allgemeinen zur bildhaften und dreidimensionalen Erfassung des Straßenraumes eingesetzt wird. Das Messfahrzeug ist so konzipiert und dimensioniert, dass eine Befahrung sowohl des Fernstraßennetzes als auch des kommunalen Straßennetzes im fließenden Verkehr möglich ist. Die auf dem Fahrzeugdach montierte Rahmenkonstruktion trägt die Sensorik, welche mehrere Umfeldkameras, zwei Laserscanner und ein inertiales Positionierungssystem vom Typ Applanix POS LV 420 umfasst (siehe Abbildung 3-11).

Neben dem oben beschriebenen Pavement Profile Scanner Plus verfügt das I.R.I.S System noch über ein zweites hochpräzises LiDAR Instrument. Dabei handelt es sich um den ebenfalls vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik hergestellten Clearance Profile Scanner (CPS). Der CPS ist ein Rotationslaserscanner zur Erfassung von Lichtraumprofilen, der nach dem Phasenvergleichsverfahren misst. Durch die Rotation eines Spiegels erfasst der Laserscanner ein 2D Profil in einem Aufnahmebereich von 350°. Der CPS befindet sich im Heckbereich und ist so ausgerichtet, dass die einzelnen Profile quer zur Fahrtrichtung aufgenommen werden. Durch die Bewegung des Messfahrzeugs beschreibt der Laserstrahl eine Helix, wodurch der Straßenraum entlang der Trajektorie in einem etwa 30m breiten Korridor sukzessive abgetastet wird. Der CPS erreicht eine Datenrate von 2 MHz und erfasst circa 200 Profile je Sekunde. Die Genauigkeit der Längenmessung beträgt je nach Reflexionseigenschaft einer Oberfläche in 5 m Entfernung 3 bis 7 mm. Diese und weitere technischen Spezifikationen des Scanners sind bei (Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM, 2019) aufgeführt.

4 ÜBERBLICK ZUM ARBEITSPLAN DES VERBUNDVORHABENS "BETONFAHRBAHN 4.0"

Um das Vorhabenziel, mit Hilfe innovativer Technologien und Maßnahmen der intelligenten Vernetzung der Teilprozessschritte einen Beitrag zur prozesssicheren Herstellung von Betonfahrbahnen zu leisten, voranzubringen, sollten im Labormaßstab die zur Qualitätssicherung erforderlichen Werkzeuge und Methoden entwickelt und deren vorteilhafter Nutzen für die jeweiligen Teilprozesse im Technikumsmaßstab erprobt werden. Mit einer Validierung der im Verbundvorhaben entwickelten Methoden und Konzepte im Technikum sollte in einem weiteren Schritt die realen Herstellprozesse des Betonfahrbahnbaus an realmaßstäblich zu bauenden Demonstratoren unter Beweis gestellt werden. Dem Arbeitsprogramm lagen daher die vier nachfolgend benannten Arbeitsschwerpunkte zugrunde:

- Arbeitsschwerpunkt A Prozesskettenanalyse der gegenwärtigen Betonfahrbahnherstellung
- Arbeitsschwerpunkt B Schlüsselinnovationen für prozesssichere Teilschritte
- Arbeitsschwerpunkt C Intelligente Betonfahrbahnherstellung durch digitale Vernetzung
- Arbeitsschwerpunkt D Demonstration Betonfahrbahn 4.0 in der Baupraxis



Abbildung 4-1: Übersicht über die Arbeitsschwerpunkte und die Beteiligung der Verbundpartner

4.1 ARBEITSSCHWERPUNKT A – PROZESSKETTENANALYSE DER GEGENWÄRTIGEN BETONFAHRBAHNHERSTELLUNG

Im Arbeitsschwerpunkt A (Fokus rheologische Eigenschaften) wurde der eingehenden Prozessanalyse aller heute in der Praxis zum Einsatz kommenden Maschinen und Anlagen unter Berücksichtigung der für deren Betrieb erforderlichen Personen und der zu verarbeitenden Materialien eine besondere Bedeutung zugemessen. Somit fokussiert sich das Ziel des Arbeitsschwerpunkts auf die Analyse aller Prozessschritte der einzelnen Teilprozesse und welche einzelnen Arbeitsgänge durch eine äußere Beeinflussung (sich ändernde Witterung, Unaufmerksamkeit des Bedienpersonals, Ausfall von Anlagenbestandteilen, Abnutzung von Werkzeugen, Schwankungen der Eigenschaft und Zusammensetzung der Materialien, …) mehr oder weniger schnell zu einer Abweichung des Gesamtergebnisses vom angestrebten Soll führen können. Dabei sollten all jene Komponenten und Arbeitsschritte, die einen gravierenden Einfluss auf das Ergebnis des einzelnen Arbeitsschrittes oder gar der gesamten Prozesskette haben können, einer eingehenden Überprüfung unterworfen werden, um herauszuarbeiten, mit welchen Maßnahmen und Konzepten sich Abweichungen vom Soll frühzeitig erkennen lassen, um derartige Feststellungen dann auch unverzüglich einer übergeordneten Leitstelle weitergeben zu können. In der Leitstelle selbst muss wiederum eine automatisierte Bewertung der aktuellen Beobachtungen und Feststellungen vorgenommen werden können, um bei Bedarf unverzüglich und gezielt auf den Prozessablauf in einer begünstigenden Form Einfluss zu nehmen. Daher müssen Konzepte herausgearbeitet werden, wie im Falle einer Abweichung des Ergebnisses eines Prozessschrittes durch eine geeignete technische Nachjustierung aufgekommene Abweichungen wieder innerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenzen zurückgeführt werden können.

Grundsätzlich verfügen schon heute die Maschinen und Anlagen, wie sie bei der Herstellung von Betonfahrbahnen zum Einsatz kommen, über vielfältige Instrumente, mit denen eine Prozessstörungs- oder Prozessfehlererkennung visualisiert und in der internen Prozessführung berücksichtigt werden können. Auch werden innerhalb der einzelnen Prozesschritte gegebenenfalls im Prozessverlauf erforderlich werdende Anpassungen automatisch vorgenommen, um eine bestmögliche Qualität des Prozessergebnisses zu gewährleisten. Dies gilt sowohl für die Herstellung der Betone wie auch für den Betoneinbau mit dem Gleitschalungsfertiger. Auch bei den auf den Betoneinbau folgenden Prozesschritten der nachträglichen Fahrbahnbearbeitung, so dem Fugenschnitt, gilt es, die heutigen Möglichkeiten zur Feststellung möglicher Abweichungen vom Soll zu identifizieren. Dabei lässt sich aber lediglich auf optische Weise prüfen, ob die Fugen gerade sind. Bei der Herstellung von Waschbetonoberflächen kann mit Hilfe des Prüfsystems ELATextur von IWS-Messtechnik sensorisch/maschinell die Qualität der Fahrbahnoberfläche überprüft werden.

Doch fehlt es bislang an ganzheitlichen Ansätzen, alle für die Qualitätssicherung relevanten Prozessdaten an ein übergeordnetes Leitsystem weiterzugeben, um den Verlauf der gesamten Prozesskette kontinuierlich erfassen und bewerten zu können. Nur dann lassen sich im Fall von auftretenden Abweichungen vom Soll, diese sofort erkennen, um die Basis zu schaffen, gegensteuernde Maßnahmen zuverlässig einzuleiten.

Daher wurde dem Verbundvorhaben ein ganzheitlicher Systemansatz mit einer interdisziplinären Betrachtung aller Einzelprozessschritte zugrunde gelegt. So bedarf es einer grundsätzlichen Sensitivitätsanalyse der Betonfahrbahnherstellung, um die Voraussetzungen für stabile Prozessfenster der einzelnen Teilschritte der Betonherstellung, des Einbaus und der Nachbearbeitung zu schaffen, die infolge ihrer sequentiellen Bearbeitung jeweils ein entscheidendes Maß für das Gesamtergebnis mitverantwortlich zeichnen.

Daher kommt gerade der Identifizierung aller Prozessschritte, die rein zufällig oder systembedingt zu einer nachteiligen Beeinflussung der Prozessqualität führen können und die damit das Gesamtergebnis der Betonfahrbahnherstellung gefährden, eine Schlüsselrolle zu, um die Prozesssicherheit des Betonstraßenbaus in der geforderten Weise gewährleisten zu können.

4.2 ARBEITSSCHWERPUNKT B – SCHLÜSSELINNOVATIONEN FÜR PROZESSSICHERE TEILSCHRITTE

Der Arbeitsschwerpunkt B widmete sich innovativen Ansätzen, die zu einer Verbesserung der Ausführungsqualität bei der Herstellung von Betonfahrbahnen führen sollen, da mit ihnen die Qualitätsstandards bereits vorhandener Technologien und Methoden erhöht und mittels digitaler Erfassung und unmittelbarer Bewertung die Prozesssicherheit der Einzelschritte wie auch der gesamten Prozesskette des Betonfahrbahnbaus deutlich gesteigert werden kann. Arbeitsschwerpunkt B sucht daher Innovationen und Entwicklungen, mit denen die Prozesssicherheit zuverlässig erhöht werden kann, wie dies im BVWP 2030 grundlegend gefordert wird.

Ein wichtiger Innovationsschritt liegt in der Entwicklung, Erprobung und auch Umsetzung einer rheologiegestützten Mischprozessführung bei der Herstellung der Fahrbahnbetone. Diese Prozesssicherheit muss bei der Herstellung sowohl des Unterbetons wie auch des Oberbetons gegeben werden können, die sich in ihrer Zusammensetzung und auch in deren Verarbeitungsanforderungen deutlich unterscheiden können. Ziel dieses neuartigen Ansatzes ist es, alle, also die heutigen und zukünftigen, Betongemische mittels einer rheologiegestützten Mischprozessführung so herzustellen, dass das jeweilige Betongemisch mit seinen diversen Ausgangsstoffen in einer möglichst kurzen Mischdauer zu einem hinreichend homogenen Frischbeton zusammengeführt werden kann, das auch bei einer feinstoffreichen Betonzusammensetzung sicherstellt, dass alle feinen Partikel vollständig aufgeschlossen sind, um einen gleichförmigen Frischbeton bereitstellen zu können.

Ein Frischbeton, der über den großen Stoffumsatz beim Betonfahrbahnbau stets gleichbleibende Frischbetoneigenschaften aufweist, würde eine wesentliche Voraussetzung erfüllen, den steifen Fahrbahnbeton mit dem Gleitschalungsfertiger qualitativ hochwertig einbauen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde im Verbundvorhaben ein neuartiger Antriebsstrang für den beim bauausführenden Partnerunternehmen zum Einsatz kommenden Doppelwellenmischer entwickelt. Mit dieser Entwicklung können an einer realmaßstäblichen Mischanlage erstmals alle während des Mischverlaufs durchlaufenen Prozessphasen des Mischens anhand der zugehörigen Prozessdaten erfasst und unmittelbar noch während des Mischens bewertet werden, um im Bedarfsfall mittels eines geeigneten Prozesseingriffes den Mischvorgang innerhalb eines geeignet erscheinenden Prozessverlaufs zu halten. Grundsätzlich konnte im Vorhaben an einer realmaßstäblichen Technikummischanlage erstmals alle während des Mischens verfügbaren Daten erfasst und in Echtzeit analysiert, um auf dieser Datenbasis aufbauend eine grundlegende Bewertung der diversen Mischphasen nach Art und Qualität des Mischverlaufs vornehmen zu können. Zudem sollten Verfahrensweisen herausgearbeitet werden, mit denen der Energieeintrag des Mischers in den Beton zu maximieren. Schließlich muss in Anbetracht der hohen Einbauleistung des Gleitschalungfertigers die Mischanlage qualitativ stets gleichbleibend gute Frischbetone in großen Ausstoßmengen bereitstellen können. Entsprechend werden Möglichkeiten gesucht, die Mischzeit zu reduzieren, ohne dass aber die Frischbetonqualität gefährdet ist. Dieses Ansinnen gelingt aber nur, wenn ein ausreichender Energieeintrag im Mischverlauf dem Frischbeton zugeführt werden kann, so dass ein vollständiger Aufschluss aller feinen Feststoffkomponenten und eine homogene Vermischung aller Groben Bestandteile gewährleistet werden kann.

Mit dem im Verbundvorhaben von den Partnern gemeinsam entwickelten Antriebskonzept lassen sich während des Mischverlaufs alle verfügbaren Prozessdaten nutzen, um mit den daraus abgeleiteten Prozessanpassungen einen optimalen Prozessverlauf mit dem gewünschten Prozessergebnis, einen qualitativ hochwertigen, gleichförmigen und robusten Frischbeton für den Betonfahrbahnbau zu erzielen. Im Vorhaben sollten daher die rheologischen Eigenschaften des Gemischs bereits während des Mischens bewertet werden, um bereits prozessbegleitend wichtige Informationen zum Mischverlauf aus den Prozessdaten abzuleiten und das Mischende nicht anhand der Mischdauer, sondern anhand einer hinreichend zuverlässigen Abschätzung des rheologischen Verhaltens des Frischbetons festzulegen. So stellt die Robustheit gerade bei feinkornreichen Betongemischen, wie sie zunehmend im baupraktischen Einsatz Verwendung finden, der vollständige Aufschluss aller feinen Partikel eine große Herausforderung für die Herstellung gleichförmiger und robuster Betone dar. Über die Prozessdaten des Antriebsstranges hinaus kommt auch der zuverlässigen Bestimmung des Feuchtegehalts der Gesteinskörnungen eine große Bedeutung zu, um die am Gesteinskorn anhaftende Feuchte bei der Wasserzugabe für den steifen Fahrbahnbeton in der erforderlichen Präzision berücksichtigen zu können. Nur mit einer geeigneten Gesamtwasserzugabe (zuzugebendes Anmachwasser inklusive am Gesteinskorn anhaftendes Oberflächenwasser) kann ein Fahrbahnbeton mit der geforderten Frischbetonkonsistenz hergestellt werden.

Auch beim Gleitschalungsfertiger wurden innovative Anpassungen vorgenommen. Neben der Optimierung der Zuführung und Verteilung der Frischbetone vor dem Fertiger, für die der Maschinenhersteller bereits entsprechende Technologien bereithält, kommt vor allem der Ebenheitskontrolle und -nachsteuerung während des Betoneinbaus eine zentrale Bedeutung zu. Schließlich kann sich der Fertiger einerseits an dem Höhenniveau des Unterbaus bzw. der Tragschicht und am Niveau des Oberbetons nach dem Glätter bzw. dem Niveau der Oberkante Unterbeton orientieren und sich zur Sicherstellung eines plankonformen Höhenniveaus an diesen Informationen orientieren. Da der Ebenheit der Fahrbahnoberfläche mit Blick auf den Qualitätsstandard der Fahrbahn im Verbundvorhaben eine zentrale Bedeutung zukommt, sollten die Zusammenhänge zwischen Frischbetonkonsistenz, Anpressdruck des Glätters und des vor dem Fertiger aufgebauten Volumens an Frischbeton analysiert und bewertet werden. Die Optimierung der Beschickung der jeweiligen Fertiger für den Einbau des Unter- und des Oberbetons mit dem jeweils zu verarbeitenden Frischbeton stellte dabei eine weitere zu untersuchende Aufgabe dar. Des Weiteren kommt dem Transport des Unter- und Oberbetons in Muldenkippern, wie auch der Entladung mittels Hinterkipper (Unterbetonlage) bzw. mittels Baggerschaufel (Oberbetonlage) eine wichtige Rolle in den Untersuchungen zu. Die Herausforderung bestand aber darin, geeignete 3D-Scan-Technologien zu adaptieren, mit denen sowohl die Ebenheit des Unterbaus wie auch der Fahrbahnoberfläche des Oberbetons analysiert werden kann.

Um die Einflüsse der Rheologie des Frischbetons beim Einbau mit dem Fertiger analysieren und bewerten zu können, wurde eine realmaßstäbliche Offset-Schalung, wie sie in Fertigern zum Einsatz kommt, genutzt und in einem für das Verbundvorhaben realisierten 3D-Experimentalprüfstand an der MPA Universität Stuttgart adaptiert. Der 3D-Experimentalprüfstand befindet sich in unmittelbarer Nähe zur realmaßstäblichen Technikums-Mischanlage des IWB, so dass die optimiert hergestellten Betone zum Experimentalprüfstand geführt werden konnten und so ein Einbau des Frischbetons unter gleichen Verhältnissen wie auf realen Baustellen erfolgen kann. Auf diese Weise war es möglich, einerseits die Einsatzfähigkeit der unter optimierten Verhältnissen hergestellten Frischbetone zu analysieren und deren Robustheit beim Einbau zu analysieren. Des Weiteren konnten aber auch die im Vorhaben entwickelten Methoden, z.B. zur zerstörungsfreien Bestimmung des Zeitpunkts für das Bürsten der Oberfläche (Waschbetonbauweise) sowie für den Fugenschnitt, erprobt und validiert bzw. abhängig der hier gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt werden.

Des Weiteren wurden innovative Technologien gesucht, adaptiert und weiterentwickelt, mit denen der geeignete Zeitpunkt zur Herstellung der Waschbetonoberfläche festgestellt werden kann. Nur mit der Kenntnis des geeigneten Zeitpunkts der Bearbeitbarkeit mittels Bürste ist es möglich, die geforderten Qualitätsansprüche an der Waschbetonoberfläche zu erfüllen. Hierzu wurde auf ein für die Bewertung des Schalungsdrucks entwickeltes Ultraschallmessverfahren weiterentwickelt und auf die Problemstellung der Feststellung des geeigneten Hydratationsgrads des Fahrbahnbetons hin angepasst. Die gleiche US-Technologie soll auch Verwendung finden, um den geeigneten Zeitpunkt zur Herstellung des Fugenschnitts festzustellen, um die bislang hohen Risiken eines Ausbruchs von Gesteinskörnern an der Fahrbahnoberfläche aus der Feinmörtelmatrix beim Schneiden zu vermeiden. Von weiterem Interesse bei der Bearbeitung des Verbundvorhabens war, die Lage der Dübel zuverlässig zu sichern, da diese für die Positionierung des nachlaufenden Fugenschnittes von sehr großer Bedeutung sind.

4.3 ARBEITSSCHWERPUNKT C – INTELLIGENTE BETONFAHRBAHNHERSTELLUNG DURCH DIGITALE VERNETZUNG

Mit Hilfe der in Arbeitsschwerpunkt A durchgeführten Prozessanalysen stehen die wesentlichen Informationen zur Verfügung, an welchen Stellen der Prozesskette Sensoren zu installieren sind, um die für den jeweiligen Teilschritt der Betonfahrbahnherstellung wichtigen Prozessinformationen erfassen und über die digitale Vernetzung aller Teilprozesse der Leitebene der gesamten Prozesskette zugänglich zu machen. Abhängig der Bewertung der Gefahren eines vom Soll abweichenden Prozessergebnisses in den einzelnen Arbeitsschritten müssen dann Maßnahmen identifiziert und ausgelöst werden, um den Prozessverlauf des jeweiligen Arbeitsschrittes aber auch der gesamten Prozesskette innerhalb der erlaubten Toleranzen zu halten. Neben den in Arbeitsschwerpunkt B benannten Prozessinformationen, die von den einzelnen Teilschritten der Betonfahrbahnherstellung benötigt werden, müssen noch weitere Informationen erfasst werden, um den gesamten Verlauf des Bauprozesses zuverlässig visualisieren und bewerten zu können, damit im Bedarfsfall sich plötzlich abzeichnende Abweichungen vom Zielwert durch geeignete und situationsangepasste Gegenmaßnahmen rechtzeitig abgefangen werden können.

Die Zusammenführung aller prozessrelevanten Daten erforderte im Rahmen der Bearbeitung des Verbundvorhabens die Vernetzung aller Teilschritte des gesamten Bauprozesses. Durch die stete Verfügbarkeit aller erforderlichen Daten zu den einzelnen Zielprozessen stehen damit alle steuerungsrelevanten Informationen zur Baustelle selbst, wie auch zu den sonstigen für den Fertigungsprozess wichtigen Informationen, z.B. Wetterdaten und Wetterprognosen, zur Verfügung. Im Verbundvorhaben wurde hierzu eine offene Datenplattform geschaffen, in der alle prozessrelevanten Daten eingestellt und für die weitere Bearbeitung zur Verfügung gestellt sind. Auf dem aktuellen Stand der im Verbundvorhaben entwickelten Plattform können aktuell alle an der Herstellung der Betonfahrbahn Beteiligten die für die Logistiksteuerung, für die Betonherstellung und den Betoneinbau mit dem Fertiger wie auch den darauffolgenden Nacharbeiten des Bürstens und Fugenschneidens erforderlichen Informationen in Echtzeit aus dem laufenden Prozess bereitgestellt werden. Darüber hinaus bietet die Datenbereitstellung alle notwendigen Informationen, um digitale Bautagebücher zum fortlaufenden Baugeschehen automatisch zu erstellen.

Aufbauend auf den Grundüberlegungen von BIM (Building Information Modeling) wird so mit der Bereitstellung der prozessintegrierten Sensor-Aktor-Informationen erstmals die Möglichkeit geboten, den Prozessverlauf aller Teilprozesse im Einzelnen aber auch der Interaktion aller vernetzten Teilschritte als Ganzes betrachten und für die Optimierung des individuellen Teilprozesses zu berücksichtigen. Die Herausforderung bestand im Vorhaben u.a. darin, für alle am Bauprozess beteiligten Baumaschinen, so der Betonmischanlage, den Transportfahrzeugen, die Gleitschalungsfertiger, die Maschinen zur Herstellung der Waschbetonoberfläche und zur Herstellung der Quer- und Längsfugen mit geeigneten Schnittstellen zum Datenaustausch auszustatten und gleichzeitig jeder Maschine auch Systemkomponenten zuzuordnen, mit denen eine Positionierung einer jeden Maschine eindeutig und nachverfolgbar sichergestellt ist. Zudem musste die Baustellenumgebung, die Materiallogistik und die am Bauprozess beteiligten Personen (Bauleitung und am Bau Beteiligte) in die Nutzung der Datenplattform eingebunden werden. In der Summe lässt sich dann aber ein Soll-Ist-Abgleich vornehmen, um eine für die prozesssicher Steuerung aller am Bauprozess beteiligten Maschinen und Anlagen im Sinne des BVWP 2030 vornehmen zu können. Mit der im Verbundvorhaben entwickelten und an den Demonstratoren erprobten Plattform steht nunmehr ein äußerst interessantes Werkzeug zur Verfügung, das auch für die weitere Dokumentation und den Betrieb der Betonfahrbahn aller bauseitigen bau- und kontextspezifischen Daten räumlich verortet für die Nutzung im weiteren Lebenszyklus zur Verfügung steht. Dies dürfte gerade für das Erhaltungsmanagement der Betonfahrbahn von großem Interesse sein.

4.4 ARBEITSSCHWERPUNKT D – DEMONSTRATION BETONFAHRBAHN 4.0 IN DER BAUPRAXIS

All die entwickelten und im Labormaßstab und im Technikum erprobten innovativen Ansätze, Werkzeuge und Methoden wurden im Rahmen der Bearbeitung des vorliegenden Arbeitsschwerpunkts bei einer realen Baumaßnahme anlässlich zweier Demonstrationsstrecken erprobt und hinsichtlich der Praxistauglichkeit bewertet und validiert. Um an den Demonstratoren die innovativen Entwicklungen nutzen zu können, mussten die in den Technikumsversuchen herausgearbeiteten Entwicklungen und Maschinenanpassungen auf die auf den beiden Demonstrationsstrecken eingesetzten Anlagen und Maschinen übertragen werden. Daher wurden die auf den Baustellen befindlichen Maschinen im Vorfeld des Baus der beiden Demonstratoren umgebaut bzw. mit Erweiterungen und Ergänzungen angepasst werden. Mit den erfolgten Maßnahmen konnte dann aber der Bau Demonstratoren vorgenommen werden und die im Vergleich zur Standardbauweise verbesserten Prozessverläufe der Betonfahrbahnherstellung analysiert und bewertet werden.

Da die Leistungsfähigkeit des Gleitschalungsfertigers im Wesentlichen von der Qualität und Gleichförmigkeit der angelieferten Betone abhängig ist, kommt der Verwendung robuster Straßenbetone eine zentrale Rolle im Vorhaben zu. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zur Sicherstellung einer Beschickung des Fertigers mit gleichförmigen und robusten Frischbetons neben der Frischbetonqualität des Herstellens in der Mischanlage auch dem weiteren Logistikablauf eine große Bedeutung zukommt. Denn erreicht das Fahrzeug den Einbauort und die Betoneigenschaften haben sich zwischen der Übergabe an der Mischanlage bis zur Materialübergabe an der Einbaustelle verändert, kommt es zu erheblichen Störungen und Einbußen hinsichtlich der geforderten Qualität des eingebauten Fahrbahnbetons. r er wichtiger Stellenwert zu. Erreicht der Beton den Einbauort mit dem Kipper oder Fahrmischer, müssen die Planungsdaten auf den Bauablauf abgeglichen werden können. Über die Maschineninformationen hinaus sollten mit der Realisierung der beiden Demonstrationsstrecken von allen Verbundpartnern in der interdisziplinären Zusammenarbeit weitere Daten wie Materialverbrauch, Bedarf an elektrischer und thermischer Energie, Temperatur, Lageparameter etc. erfasst und dokumentiert werden.

5 ARBEITSSCHWERPUNKT A - PROZESSANALYSE DER HEUTIGEN BETONFAHRBAHNHERSTELLUNG

5.1 ARBEITSPAKET A1 – ERFASSUNG PROZESSRELEVANTER DATEN UND PARAMETER

Im Zuge laufender Bauvorhaben soll an vier unterschiedlichen Baustellen die Herstellung von Betonfahrbahnen von allen Projektbeteiligten untersucht werden. Dabei sollen alle Prozessschritte, von der Logistik der Rohstoffanlieferung, über die Betonherstellung in der mobilen Mischanlage, über den Transport der Betone zum Einbauort, über den Einbau und die Verdichtung der Fahrbahnbetone mit dem Gleitschalungsfertiger, über die Nachbearbeitung bis hin zum Schneiden der Fahrbahnbetone und der zum Abschluss der Arbeiten erzielten Beschaffenheit und Ebenheit der Fahrbahnoberfläche erfasst, bewertet und auf Optimierungspotenziale hin analysiert werden. Jeder Projektpartner soll dabei die von ihm zu untersuchenden Teilprozesse eingehend analysieren. Neben der Analyse des Materialflusses im Zuge der heute üblichen Abfolge des Herstellens, Einbauens und Nachbearbeitens von Beton interessieren hierbei insbesondere der Aufbau und der Betrieb der heute im Betonfahrbahnbau zum Einsatz kommenden Anlagenkomponenten. Von den Projektbeteiligten sind die Feststellungen und Beobachtungen der jeweils analysierten Prozesseinzelschritte zu dokumentieren, zu analysieren und zu bewerten. Ziel ist die Identifikation, Erfassung und Analyse aller prozessrelevanten Parameter zur Sicherstellung einer gleichförmigen Produktqualität.

Abbildung 5-1 zeigt eine Übersicht über die betrachteten Prozessschritte und deren Zuordnung zu den APs.



Abbildung 5-1: Skizze der Teilnehmer, des Ablaufs und relevanter Schritte während des Bauprozesses.

Im Zuge des Arbeitspakets A1 war es das Ziel, alle prozessrelevanten Daten zu erfassen. Aus diesem Grunde hat man sich bereits zu einem frühen Projektzeitpunkt dazu entschieden, den Einbau von Fahrbahnbeton durch eine einzelne Person zu dokumentieren und abschließend subjektiv zu bewerten. Diese Tätigkeit wurde von einem Betontechnologen mit Ausbildung zum Baustoffprüfer übernommen. Durch diese Vorgehensweise konnten Schnittstellenprobleme wie zum Beispiel Informationsverluste bei wechselnden Beobachtern vermieden werden und eine sicherlich subjektive, aber dennoch einheitliche Bewertung erfolgen. In die darauffolgende Auswertung konnten Erkenntnisse aus der Herstellung von 199 Betonschichten aus 139 Einbautagen erfasst werden. Die abschließende Bewertung des Einbautages wurde in die Stufen "Gut", "Zufriedenstellend" und "Schlecht" unterteilt. Für einen "guten" Einbautag wurde die Messlatte sehr hoch gesetzt, sodass hierfür alles passen musste. Die Ursache für einen schlechten bzw. lediglich zufriedenstellenden Einbautag sind sehr vielfältig und können grob in die Kategorien "Betontechnologisch", "Maschinentechnik", "Witterung" und "Organisatorische Gründe" eingeteilt werden (vgl. Abbildung 5-2). Dadurch, dass die Ursachen teilweise auch in direkter Abhängigkeit voneinander stehen, wurde versucht, zunächst den Auslöser zu detektieren. Als nachfolgendes Zuordnungskriterium wurde die Ursache mit der größten Auswirkung auf die herzustellende Fahrbahn gewählt. Auf mögliche Mehrfachnennungen wurde verzichtet.

Beispiele:

- Aufgrund hochsommerlicher Temperaturen steigt die Betontemperatur auf über 30 °C an und führt zum Einbauabbruch Ursache: Witterung
- Durch eine Vollsperrung auf der Autobahn kann kein Zement an der Mischanlage angeliefert werden. Der Einbau musste daraufhin abgebrochen werden – Ursache: Organisatorische Gründe
- Defekte Feuchtesonden (Maschinentechnik) führen zu stark schwankender Betonkonsistenz (Betontechnologisch) – Ursache: Maschinentechnik



• Bei gleichen Rahmenbedingungen schwankt der ermittelte LP-Gehalt – Ursache: Betontechnologisch

Abbildung 5-2: Verteilung Ursachen-Kategorien

Die Ursachen für eine schlechte Tagesbewertung sind recht gleichmäßig auf die vier Kategorien verteilt. Doch überwiegt ein wenig die Ursache einer schlechten Einbausituation am Beton bzw. der Betontechnologie. Dies kann möglicherweise der Tatsache geschuldet sein, dass die Bewertung durch eine Person durchgeführt wird, welche auch die Frischbetonprüfungen durchführt.

Anlagenparameter:

Anhand der Bewertungen lassen sich keine signifikanten Unterschiede auf das Einbauergebnis ausmachen hinsichtlich des Einsatzes einer Baustellenanlage oder einer Transportanlage. Auch die zum Einsatz kommende Art der Dosierung der Gesteinskörnung (Turmanlage oder Doseuranlage) ist von nachrangiger Bedeutung. Aufgrund einer zu geringen Anzahl an Einbautagen konnte keine Bewertung für eine Sternanlage durchgeführt werden.



Abbildung 5-3: Auswirkung Anlagenart auf Einbautag



Abbildung 5-4: Auswirkung Art der Dosierung auf Einbautag

Transport:

Bei der Fahrzeugart scheint der Fahrwerksmischer (Trommelmischer) einen leichten Vorteil gegenüber Kippern zu haben. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der üblicherweise benötigten hohen Stundenleistung ein langwieriger Entladevorgang von Trommelmischern nicht praktikabel ist.



Abbildung 5-5: Auswirkung Transportfahrzeug auf Einbautag

Witterung:

Die Lufttemperaturen haben neben der Betontemperatur einen maßgeblichen Einfluss auf die Betonqualität bzw. die Verarbeitbarkeit. Dieses Verhalten findet sich in der Abhängigkeit Lufttemperatur zur Gesamtbewertung wieder. Noch ausgeprägter zeigt sich dies aufgrund des frühzeitigen Ansteifens unter der Betrachtung Lufttemperatur zur Gleichmäßigkeit der Konsistenz.



Abbildung 5-6: Auswirkung Lufttemperatur auf Einbautag



Abbildung 5-7: Auswirkung Lufttemperatur auf Konsistenz

In Analogie zu den Feststellungen bei der Lufttemperatur lassen sich diese ebenfalls auf den Parameter Betontemperatur übertragen.



Abbildung 5-8: Auswirkung Betontemperatur auf Einbautag



Abbildung 5-9: Auswirkung Betontemperatur auf Konsistenz

Darüber hinaus war es interessant zu erfahren, ob sich ein Beton mit der Konsistenzklasse C1 unterschiedlich hinsichtlich Konsistenzschwankungen zu einem Beton der Konsistenzklasse F2 verhält.

Wie im Abbildung 5-10 zu erkennen ist, sind die Unterschiede marginal.



Abbildung 5-10: Auswirkung Konsistenz auf Konsistenzschwankungen

5.1.1 A1.1 – Rohstoffe, Silobevorratung, Dosierung und Beschickung des Mischers

5.1.1.1 Rohstoffe & Bevorratung

Gleich zu Beginn des Vorhabens konnte im Rahmen von Baustellenbegehungen A1 Hamburg, erste Unterschiede in den Prozessabläufen und Rahmenbedingungen der verschiedenen Baumaßnahmen bei der Lagerung der Ausgangsstoffe beobachtet werden. Als erste Baustellen wurden die im Weiteren eingehend analysierten Baustellen A61 AS Dieblich (Di I) und A1 AK Wittlich (Wi I) sowie die im weiteren Projektverlauf nicht mehr untersuchte Baustelle auf der A1 Hamburg besucht.

Bekanntlich hat die Menge des im Frischbeton enthaltenen Wassers direkten Einfluss auf die Grünstandfestigkeit und somit auf das Einbauverhalten der Betone mit dem Fertiger. Grund ist der Einfluss von feuchter Gesteinskörnung auf den Wassergehalt der Mischung und damit auf den w/z-Wert. Nimmt der w/z-Wert zu, kommt es zu nachteiligen Abweichungen von den geforderten Betonfestigkeiten. Zudem kommt es zu ungünstigen Konsistenzverschiebungen, die den Einbau der Frischbetone mit dem Fertiger erschweren. So wurde bereits bei der Begehung der ersten Baustelle in Gesprächen mit dem Betriebspersonal über die Schwierigkeiten und Missstände bei der Ermittlung des Feuchtegehalts der Zuschlagstoffe berichtet. So ist es offensichtlich, dass der Feuchtegehalt eines Haufwerks an der Lagerstätte durch Sonneneinstrahlung und Wettereinflüsse stark unterschiedlich sein kann. Entsprechend wird die Einstellung der beim Mischen zuzugebenden Wassermenge auf der Basis der Erfahrungen des Mischmeisters und der Beobachtungen des Einbauleiters auf der Baustelle hin ausgesteuert. Auch wurde davon berichtet, dass phasenweise mit Hilfe einer künstlichen Bewässerung des Gesteinskornlagers ein gleichbleibender Feuchtegehalt herbeigeführt werden soll. Die sensorgestützte Messung des Feuchtegehalts beim Austritt aus dem Reihensilo kann meist nur als Anhaltspunkt betrachtet werden, da der Sensor nur an einer Austrittsseite misst und somit sonnengetrocknete Teilmengen im Randbereich anders zu beurteilen sind, als die größeren Teilmengen des ggfs. feuchten Haufwerks, die im Innern des geöffneten Silos als ausfließender Stoffstrom für die Feuchtesituation des Betongemisches relevant sind. Bei der Bewässerung ist aber zu berücksichtigen, dass die feinsten Körner, die produktionsbedingt durch das Brechen von Gestein entstehen und an den gröberen Gesteinskörnungen haften, abgewaschen werden und sich somit separieren. Da der Mehlkorngehalt des Betons direkten Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften hat, wurde dieser Sachverhalt in den weiteren Überlegungen eingehend analysiert. Die Unterschiedlichkeit der Feuchtezustände der Betonausgangsstoffe lässt sich anhand der beiden gegenübergestellten Fotos in Abbildung 5-11 entnehmen. So zeigt das linke Foto die Lagerung der Ausgangsstoffe der Maßnahme auf der Baustelle A1 Hamburg. Hier kam keine Bewässerung der Gesteinskornhalden zum Einsatz. Demgegenüber verdeutlicht das rechte Foto die Auswirkungen einer Bewässerung, wie diese bei der Maßnahme A1 Wittlich (Wi 1) beobachtet wurde. Es ist offensichtlich, dass ohne die Sicherstellung konstanter Ausgangsbedingungen ein gleichförmiger Frischbeton für den Fahrbahnbau kaum herzustellen ist und eine automatische Herstellung von Betonfahrbahnen mit den bisher standardmäßig verfügbaren Technologien der Herstellung von Beton und des Einbaus nur schwer realisiert werden kann. Die Befeuchtung der Splitthalden dient dem Herunterkühlen der Gesteinskörnung mit dem Ziel, bei hochsommerlichen Temperaturen die Betontemperatur auf unter 30°C zu führen bzw. zu halten. Aufgrund der erforderlichen kontinuierlichen Splittversorgung kommt es infolge der steten Nachversorgung der Halden mit neu angeliefertem Splitt unweigerlich zu Feuchtigkeitsschwankungen bei der Beschickung der Doseure mit "trockener" Neuanlieferung und "feuchter" Lager-Gesteinskörnung. Es ist aber durchaus auch möglich, dass eine "sehr feuchte" Neuanlieferung mit der "feuchten" Lager-Gesteinskörnung zu einer weiteren Feuchteanhebung der Gesteinskörnung führt.



Abbildung 5-11: Lagerung der Ausgangsstoffe ohne (links) und mit Bewässerung (rechts)

Des Weiteren wurden folgende Punkte systematisch analysiert:

- Organisation der Materialbevorratung
- Prüfung, welche Möglichkeiten der Stoffdatenerfassung im Baustellenbetrieb umsetzbar wäre
- Lagerung der Rohstoffe
- Häufigkeit des Stoffumschlags

Im Zuge der vorgenannten Untersuchungen zeigte sich, dass vor allem die Faktoren

- Beschaffenheit und Lagerung der Gesteinskörnung
- Charakterisierung und Einwaage der Ausgangsstoffe in der Mischanlage
- Fertigkeiten und Erfahrungswerten des Mischmeisters / Einbaumeisters
- Transport des Frischbetons von der Mischanlage zum Fertiger

einen signifikanten Einfluss auf die Güte des einzubauenden Betons haben. Entsprechend der Bedeutung dieser Aspekte hinsichtlich der Forderung eines gleichförmigen Frischbetonverhaltens die Frischbetonkonsistenz betreffend kommt auch der möglichen Wirkung sich kumulierender Überlagerungen eine große Bedeutung zu. So wird unter einer negativen Kumulation sukzessiver Prozessschritte z.B. anhand der Gesteinskörnung u.a. die zu ungenaue Erfassung des Wassergehalts der Gesteinskörnung durch die Feuchtemesssonden der Mischanlage bei gleichzeitiger Abweichung der Soll-Ist-Sieblinie und einer daraus resultierenden oder technisch bedingten fehlerhaften Einwaage verstanden.

Obwohl sich bei der Analyse der Gesteinskörnungen der jeweiligen Baustelle für den untersuchten Zeitraum keine großen Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Werten hinsichtlich Sieblinie und Rohdichte im Rahmen der zahlreichen durchgeführten Untersuchungen zeigten, verdeutlichen die Analysen, dass dem festgestellten erhöhten Feinanteil der gebrochenen Gesteinskörnungen im Rahmen der weiteren Untersuchungen eine Beachtung geschenkt werden muss. So konnte nahezu auf jeder der besuchten Baustelle ein erhöhter Feinanteil beobachtet werden. Die Anhaftung von feinem Material konnte speziell bei der groben Gesteinskornfraktion haptisch und visuell erfasst werden. Als Ursache hierfür können mehrere Faktoren genannt werden. Neben einer von den diversen Baustoffprüfern und Betontechnologen auf den Baustellen hauptsächlich genannten unzureichenden Entstaubung der Gesteinskörnung im Steinbruch, können sowohl materialtypische Hafteigenschaften, der hohe Feuchtegehalt an der Kornoberfläche als auch die eingesetzte Maschinentechnik die zu einer Anreicherung von Feinanteilen führt, begünstigend beitragen. Eine Zwischenlagerung der Gesteinskörnung und/oder einer Vermengung feiner und grober Gesteinsfraktionen infolge enger Lagerplatzverhältnisse können ebenfalls eine Rolle spielen. Diese Einflussfaktoren können entweder einzeln oder gemeinsam auftretend. Grundsätzlich wurde das Problem des hohen Feinkornanteils aber auf nahezu jeder der untersuchten Baustellen beobachtet. Des Weiteren kann die unterschiedliche Konditionierung der Gesteinskörnung hinsichtlich des Feuchtgehalts, entweder rein durch Umwelteinwirkung oder durch den Betrieb einer Bewässerungsanlage, zu erheblichen Schwankungen der Gesteinskornfeuchte führen. Erschwerend kommt hinzu, dass auf der ein oder anderen Baustelle nur die feine Gesteinskörnung bewässert wird und demgegenüber die groben Gesteinskörnungen den Umwelteinwirkungen unterworfen sind und somit in der Mischanlage beim Dosieren der Gesteinskörnung die kühle mit der trockenen und warmen Gesteinskörnung zusammengeführt werden. Vergleichsuntersuchungen zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Gesteinskörnungen mittels analogem Darrversuch und mobiler digitaler Feuchtemesstechnik führten zu nahezu deckungsgleichen Ergebnissen. Bei einer entsprechend sorgfältigen Kalibrierung und Handhabung der Feuchtesonde ist vor allem der zeitliche Vorteil zu nennen, der durch den Einsatz einer mobilen Feuchtemesstechnik gegen ist. Gerade für die Kalibration der stationären Silosonden bedarf es eines hohen messtechnischen Aufwands im Labor, um für die feuchtekritischen respektive feuchtetechnisch stark schwankenden Gesteinskörnungen eine zuverlässige Feuchteerfassung im Leitrechner der Mischanlage zu hinterlegen.

5.1.1.2 Dosierung und Einwaage

Eine detaillierte Analyse der Dosierung und Einwaage erfolgte im Rahmen der Analyse der Mischanlage. Die entsprechenden Untersuchungsergebnisse sind folglich in AP A1.2 in Kapitel 4.1.2.3 dargestellt.

5.1.2 A1.2 – Analyse der mobilen Mischanlagen

Einen wesentlichen Bestandteil der Baustellenuntersuchungen nahm die Begehung und Analyse der jeweils zum Einsatz kommenden Mischanlagen ein. Hierbei wurden baustellenspezifisch unterschiedliche Maschinentypen vorgefunden:

- *A1 Hamburg*: hier wurde eine Mobilmix 3.5 der Firma Liebherr mit zwei 3,5m³ Doppelwellenmischern zur Herstellung der beiden Betonsorten für den Unter- und den Oberbeton eingesetzt
- *A61 Dieblich (Di I)*: hier wurden die beiden Betonsorten in zwei verschiedenen Transportbetonwerken hergestellt
- A61 Dieblich (Di II): hier wurde anstelle des einen Transportbetonwerks der Maßnahme in (Di I) eine mobile Mischanlage mit 3,3m³ Fassungsvermögen zum Einsatz gebracht
- *A1 Wittlich (Wi I)*: hier wurde eine Tandemanlage (Mobilmix 2,5 F) der Firma Liebherr mit zwei Doppelwellenmischern mit je 2,5m³ Mischvolumen hergestellt.
- *Flugvorfeld von Köln-Wahn (KW I)*: hier wurde ein mobiles Mischwerk mit zwei Doppelwellenmischern (Mobilmix 2,5 F) der Firma Liebherr eingesetzt
- Wittlich (Wi II): gleiche Anlage wie im Flugvorfeld von Köln-Wahn (KW I). Die Anlage wurde am Standort in Wittlich mit umfassender Messtechnik zur Erfassung prozessrelevanter Größen ausgestattet
- *Flugvorfeld Köln-Wahn (KW II)*: Einbezug der Erkenntnisse aus den Daten von (Wi II) bei der Fortführung der Baustelle, die dann ihrerseits wieder zur Erfassung und Auswertung von neuen Datensätzen führte

In allen analysierten Anlagen kam der bewährte Antriebsstrang für Doppelwellenzwangsmischer zum Einsatz, der aus je zwei Planetenkegelradgetrieben besteht, da hier pro Mischerwelle ein Getriebe verbaut ist. Die Getriebe werden bei allen Mischern über ein oder zwei Motoren angetrieben. Hierzu wird der Antrieb über einen Keilriementrieb vorgenommen, der an der Kegelritzelwelle sitzt. Die Getriebe sind über eine Gelenkwelle, die die Kegelritzelwellen verbinden, synchronisiert. Die mechanische Kraftwandlungskette ist schematisch in Abbildung 5-12 dargestellt.



Abbildung 5-12: Vereinfachte schematische Darstellung der Kraftwandlungskette.

Es kann davon ausgegangen werden, dass über das anliegende Drehmoment und die vorgegebene Drehzahl beziehungsweise deren Verläufe auf den Zustand der Vermischung und Homogenisierung der Ausgangsstoffe geschlossen werden kann. Für die im Forschungsvorhaben angestrebte rheologiegestützte Mischprozessführung erscheint nach derzeitigem Kenntnisstand dieser Antrieb allerdings zu weich. Zu weich bedeutet, dass der Keilriemen bei hohen Antriebskräften auf die Mischwelle und großen Widerständen durch das steife Betongemisch zum einen zu einer Verformung des Keilriemens selbst oder aber auch zu einem Schlupf des Keilriemens auf der Riemenscheibe führen kann und sich somit keine absolut zuverlässige Aussage zwischen Mischerwellengeschwindigkeit und Mischerwellendrehbewegung gegeben werden kann. Diese ist bei einer rheologischen Betrachtung des Mischvorgangs aber zwingend erforderlich. Schließlich stellt beim Antrieb über den Keilriementrieb der Keilriemen die weichste Komponente der Kraftwandlungskette dar. Der Antriebstrang wird daher detailliert in AP B1 im Kontext der Umsetzung einer rheologiegestützten Mischprozessführung behandelt.

Eine mischprozessnahe Messung der Rheologie wird in derzeit im Markt verfügbaren Betonmischanlagen nicht durchgeführt. Es werden Daten des Betriebszustands des Motors über die Motorsteuerung aufgenommen. Die Daten lassen nur Schluss auf die Konsistenz des Betons mit einer gewissen Unschärfe zu. Die Unschärfe im Schluss auf die Konsistenz ist ein Resultat des weichen Antriebsstrangs. Der Keilriementrieb ist mit Schlupf behaftet und gibt somit für jede abrufbare Position des Motors und die Stromaufnahme des Motors nicht die tatsächliche Lage der Mischwellen und das dort vorherrschende aktuelle Moment wieder.

Sofern ein geeignetes Modell des Antriebsstrangs verfügbar ist, können diese Effekte jedoch identifiziert und teilweise herausgerechnet werden, um eine erste Abschätzung zu erhalten. Erste Beobachtungen dazu sind in der folgenden Analyse der Baustellenmischanlagen beschrieben. Eine detailliertere Modellierung des Antriebsstrangs als Vorarbeit zur Mischprozessführung ist in AP B1.2 zu finden. Dieses Modell wird auch in der Technikumsanlage an der Universität Stuttgart zur Umsetzung gebracht.

Im Rahmen der Baustellenbesichtigungen wurden folgende Punkte systematisch analysiert:

- Analyse der einzelnen Bauabschnitte
- Sichtung der Auswirkung der Betoneigenschaften im Einbringprozess
- Erfassung von relevanten Messdaten an der Mischanlage
- Analyse des Transportprozesses

Des Weiteren wurden die prozessrelevanten Signale der Mischanlagensteuerung definiert. Diese sind:

Mischer-Verschluss auf, Ventil Wassernachdosierung in Mischer, Ventil Zementwaage öffnen, Ventil Wasserwaage öffnen, Ventil Zusatzmittelwaage entleeren Behälter 1, Ventil Zusatzmittelwaage entleeren Behälter 2, Ventil Zusatzmittelwaage entleeren Behälter 3, Ventil Zusatzmittelwaage entleeren Behälter 4, Zusatzmittelwaage Spülventil Behälter 1, Zusatzmittelwaage Spülventil Behälter 2, Zusatzmittelwaage Spülventil Behälter 3, Zusatzmittelwaage Spülventil Behälter 4, Zementtemperatur Silo1, Zementtemperatur Silo2, Zementtemperatur Silo3, Betontemperatur, RC Wasser Dichte, Mischer Wirkleistung in KW, Lufttemperatur, Aktueller Istwert Wassernachdosierung in Liter, Aktueller Istwert Zuschlagwaage, Aktueller Istwert Zementwaage, Aktueller Istwert Zusatzmittelwaage, Aktueller Istwert Wasserwaage. Durch die Analysen sowie das vorhandene Knowhow der Firma Liebherr konnten folgende fünf übergeordnete Bereiche detektiert respektive bestätigt werden, welche die Qualität des Mischprozesses zentral beeinflussen:

- **Dosierung und Einwaage der Rohstoffe.** Dazu wurden anhand der aufgezeichneten Messdaten in Köln-Wahn (KW I) und Wittlich (Wi I) und (Wi II) die Verteilung und Gleichmäßigkeit der Einwaagen analysiert. Zudem zählt hierzu die Feststellung der Stoffeigenschaften wie z.B. Feuchte.
- **Zugabe-Zeitpunkt und -Dauer der einzelnen Komponenten**. Exemplarisch müssen und werden aktuell folgende Abläufe bzw. Fragen kritisch analysiert: Wann erfolgt die Zugabe von Zusatzmittel? Wie wird der Massenstrom der Zementzugabe geregelt? Wann wird der Mischer mit der Gesteinskörnung beschickt? Wie wird der Massenstrom des Wassers geregelt?
- Verteilung und Zugabe der Komponenten in den Mischer. In diesem Kontext müssen und werden aktuell unter anderem die Position der einzelnen Zugabestutzen im Mischer und zueinander oder auch die Auswirkungen des Prallbleches zur Vorverteilung des Wassers und der Zusatzmittel systematisch analysiert.
- Verschmutzungsgrad der Rührarme und Mischwellen. In einem ersten Schritt wurden hierzu folgende Einflussfaktoren detektiert: Feinanteil Rezept, Zement- / Füllersorte, Betonkonsistenz, Zugabezeitpunkt, Zugabedauer, Chargengröße, Mischerentstaubung.
- Leistungseintrag, Geometrie und Drehzahl des Mischwerks. Der Energie- bzw. Leistungseintrag der Mischwelle in das Mischgut nimmt eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Konsistenz ein. Dementsprechend wurde untersucht, nach welchen Kriterien der Mischvorgang heutzutage gesteuert wird. Dabei wird die Drehzahl meist konstant gehalten. Der Leistungseintrag bzw. die Endleistung vor dem Leeren des Mischers kann dazu herangezogen werden. Dazu kann, um die Qualität des Mischprozesses systematisch zu steigern, die Geometrie, d.h. beispielsweise die Anzahl der Mischarme, die Anordnung der Mischarme oder auch die Winkel der Schaufeln systematisch analysiert und angepasst werden. Hierzu wird unter anderem der Einfluss der Drehzahl des Mischwerks auf die Mischqualität untersucht. Des Weiteren gilt es den optimalen Füllgrad des Mischers zu bestimmen.

Wie in Kapitel 15.5.3 für die Baustelle Wittlich und insbesondere in Kapitel 15.5.4 für Köln-Wahn beschrieben, erfolgte eine detaillierte Aufzeichnung aller relevanten Messgrößen an einer Liebherr Mobilmix 2.5 Mischanlage über den gesamten Einbauzeitraum hinweg.

Dazu wurde die Datenerfassung in der Liebherr-Steuerung ergänzt. So stehen zum einen Daten aus dem Produktionslog (Datenbank) zur Verfügung, welche in jeder Charge einmalig aufgezeichnet werden. Zum anderen wurde ein Datenlogger ergänzt, welcher z.B. Leistungsdaten über die gesamte Zeit mit aufzeichnet und so neben den ereignisdiskreten Batchdaten eine zeitkontinuierliche Bewertung des Leistungsverlaufs und damit eventuell auch der Qualität ermöglicht. Damit liegen die Maschinen- und Funktionsschriebe der Mischanlage für 4 Baustellen (*Wi I, Wi II, KW I, KWII*) detailliert vor und können ausgewertet werden. Anhand dieser Daten werden die identifizierten Einflussfaktoren im Folgenden detaillierter analysiert. Die Auswertungen wurden dabei durch das ISYS durchgeführt und im Folgenden unter verschiedenen Perspektiven näher beleuchtet.

5.1.2.1 Baustellenübersicht & Statistiken

Die Datenaufzeichnung ermöglicht zum einen eine detaillierte Analyse der Baustellen als auch erste Einsichten in typische Produktionsmengen sowie Variationen und Schwankungen, die im realen Betrieb auftreten. Diese Informationen können dann im Arbeitsschwerpunkt B1 herangezogen werden, um entsprechende Auswirkungen im Labormaßstab zu untersuchen.

Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-17 zeigen eine Übersicht über die Tagesleistung der Mischanlagen an den aufgezeichneten Tagen für die 4 näher betrachteten Baustellen *Köln-Wahn I (KW I), Wittlich I (Wi I), Köln-Wahn* II (KW II) und Wittlich II (Wi II). Dabei ist die Tagesleistung in Anzahl der Chargen (Mischungen, Batches) gegeben. Die Daten sind klassifiziert gemäß:

- Baustelle
 - o KW I
 - o Wil
 - o KW II
 - o Will
- Mischer
 - o Mischer 1 (M1)
 - Mischer 2 (M2)
- Betonart
 - C1-Beton (für Flugvorfeld)
 - F2-Beton (für Handfelder)
 - Unterbeton (UB, bottom layer (BL))
 - Oberbeton (OB, top layer (TL)).

In den Abbildungen ist jeweils die Gesamtzahl *n* der gefahrenen Mischungen als Beschriftung der y-Achse angegeben. Z.B. wurden in (*KW I*) insgesamt 1.984 Chargen des C1 Betons auf Mischer 1 sowie 2.020 auf Mischer 2 gefahren. In der Regel gilt, dass Mischer 1 und Mischer 2 parallel mit demselben Rezept betrieben wurden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5-13 gezeigt, in der die produzierten Chargen des Mischer 1 oben und des Mischers 2 darunter dargestellt sind. Die Produktionsmenge der beiden Mischanlagen stimmt dabei gut überein.



Abbildung 5-13: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 (oben) und Mischers 2 (unten) bei der Baustelle **KW I** für den C1-Beton

Abbildung 5-13 zeigt zudem, dass in *(KW I)* über den Einbauzeitraum vom 13.06.2018 bis 16.08.2018 maximal 140 Chargen C1 Beton am Tag und pro Mischer gefahren wurden. Dies entspricht einem Einbau von 350 m³. Über die insgesamt 18 Einbautage wurden damit ca. 4.000 Chargen Beton gemischt. Dies führt zu einer gesamten Einbaumenge von 10.000 m³. Die Fertigungsleistung hängt dabei sowohl von der Baustellenart als auch den täglichen Einbauzielen ab. An Tagen mit sehr geringer Tagesleistung wie dem 13.06.2018 fand die erste Inbetriebnahme der Mischanlage statt. Weitere Gründe für Tage mit geringer Produktionsleistung sind Anpassungen der Mischanlage oder des Rezepts sowie schlechte Einbaubedingungen.

Analog dazu ist in Abbildung 5-14 die Produktionsmenge des F2-Betons dargestellt, welcher vor allem für den Einbau der Handfelder in *(KW I)* genutzt wurde. Im Vergleich zum C1-Beton wurden mit 809 deutlich weniger Chargen gefahren. Durch den manuellen Einbau sowie die kleineren Bereiche der Handfelder wurde zudem eine geringere Chargenanzahl von maximal 80 Chargen pro Tag produziert.



Abbildung 5-14: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle KW I für den F2-Beton (Handfeld)



Abbildung 5-15: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle **KW II** für den C1-Beton (oben) und F2-Beton (unten)

Analog dazu können die weiteren Baustellen kurz betrachtet werden. In Analogie zu (KW I) wurde auf der Baustelle (KW II) ebenso C1-Beton für den maschinellen Einbau sowie F2-Beton für die Handfelder produziert. Aus Abbildung 5-15 ergibt sich, dass Mischer 1 über den Erfassungszeitraum vom 03.05.2019 bis 16.07.2019 1408 Chargen C1 Beton und 535 Chargen F2 Beton produziert hat. Dabei lag die maximale tägliche Produktion ähnlich wie bei (KW I) bei ca. 140 Chargen für den C1 Beton und bei ca. 80 Chargen für den F2 Beton.

Im Gegensatz zu *(KW I)* und *(KW II)* wurde in *(Wi I)* eine Autobahnbaustelle mit zweilagigem Betoneinbau betrachtet. Dementsprechend erfolgt im Folgenden eine Unterscheidung nach Unter- und Oberbeton. Im Zeitraum der Baustelle *(Wi I)* vom 27.08.2018 bis 14.09.2018 wurden dabei 1.603 Chargen Unterbeton und 706 Chargen Oberbeton auf einem Mischer gefertigt. Wie in Abbildung 5-16 dargestellt, wurden dabei bis zu 175 Chargen UB und 80 Chargen OB pro Tag und Mischer produziert, was einer kombinierten Produktion von ca. 640 m³ entspricht. Dies ist knapp doppelt so viel wie auf der Baustelle in *(KW I)* und *(KW II)* und ist mit durch den kontinuierlicheren Einbau auf einer Autobahnbaustelle bedingt. Wie zu erwarten, korreliert dabei die Menge des OB zum UB.

Bei der Baustelle (*Wi II*), welche als Folgelos an (*Wi I*) realisiert wurde, können ähnliche Zusammenhänge betrachtet werden. Über den Einbauzeitraum vom 19.09.2019 bis 28.10.2019 wurden dabei pro Mischer ca. 3.260 Chargen UB und 1.030 Chargen OB gefertigt. Dies entspricht mit 10.725 m³ pro Mischer knapp dem doppelten Einbauvolumen von (*Wi I*). Im Vergleich zu (*Wi I*) ergibt sich zudem eine höhere maximale Produktionsmenge von bis zu 250 Chargen UB pro Tag und Mischer.



Abbildung 5-16: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle **Wi I** für den Unterbeton (oben) und Oberbeton (unten)



Abbildung 5-17: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle **Wi II** für den Unterbeton (oben) und Oberbeton (unten)

Zusammenfassend sind die wichtigsten Mischanlagendaten in Tabelle 5.1 gegeben um einen Überblick über die Baustelle sowie verbrauchten Materialien und Schwankungen zu geben. Dabei ist die Anzahl der Chargen sowie des produzierten Betonvolumens jeweils für jeden Mischer einzeln als auch in Summe aufgetragen. Dabei zeigt sich wie zuvor erwähnt, dass Mischer 1 und Mischer 2 die meiste Zeit im parallelen Betrieb produzieren und die Chargenanzahl annähernd identisch ist. Kleinere Unterschiede ergeben sich durch Einzelanforderungen z.B. zum Ende einer Einbaustrecke sowie durch vereinzelte Testchargen. Einzig das Produktionsvolumen des F2 Betons unterscheidet sich davon, da dieser in kleineren Mengen für die Handfelder produziert wurde. Dieser wurde größtenteils nur auf Mischer 1 gefahren.

Bau-		Beton-	Chargen	Betonvolu-	Chargen	Betonvolu-	Chargen	Betonvolumen
	stelle	sorte	M1	men M1	M2	men M2	M1&M2	M1&M2
			[-]	[m3]	[-]	[m3]	[-]	[m3]
	KW I	C1	1998	5039	2030	5119	4028	10158
		F2	855	2149	14	35	869	2184
	KW II	C1	1412	3406	1360	3272	2772	6678
		F2	543	1293	124	296	667	1589
	Wi I	TL	708	1799	709	1807	1417	3605
		BL	1608	3849	1598	4027	3206	7876
	Wi II	TL	1048	2462	1021	2404	2069	4867
		BL	3297	3764	3279	7815	6576	15620

Tabelle 5.1: Übersicht der Kenngrößen der Baustellen gemäß Mischanlagendatenbank

Insgesamt zeigt die Tabelle 5.1 die großen Produktionsvolumina, welche während eines Bauprojekts umgesetzt werden. So wurden z.B. auf der Baustelle (*KW I*) mehr als 10.000 m³ und in (*KW II*) knapp 6.700 m³ an C1 Beton produziert. Anhand der Daten von *(Wi II)* zeigt sich gut das Verhältnis der Menge von Unter- zu Oberbeton. Mit einer Einbaudicke von 22mm Unterbeton zu 8mm Oberbeton ergibt sich ein Verhältnis von 2,75:1. Dieses lässt sich gut im Betonvolumen erkennen. Auf 4.867 m³ Oberbeton kommt mit 15.620 m³ etwa die dreifache Menge an Unterbeton.

In Ergänzung zum gesamten eingebauten Volumen an Beton sind in Tabelle 5.2, Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 die Mengen der eingewogenen Rohstoffe verzeichnet. Dadurch, dass für Köln-Wahn und Wittlich jeweils eine konsekutive Maßnahme erfolgte, kann ein Vergleich zwischen der zeitlich ersten (*KW I, Wi I*) und zweiten (*KW I, Wi I*) Baustelle gezogen werden. Da teilweise leicht unterschiedliche Chargengrößen (z.B. einzelne kleinere Chargen mit 1,5 m³ anstatt 2,5 m³) gefahren wurden, sind kleinere Schwankungen nicht auszuschließen, welche die Streuung der Messwerte leicht erhöhen. Aufgrund der großen Chargenanzahl kann diese Streuung jedoch als statistisch irrelevant betrachtet werden. Dementsprechend bieten die Daten eine gute Grundlage, um Aussagen über typische Mengen und insbesondere Rezeptschwankungen auf einer realen Baustelle zu treffen.

Dazu wird zunächst der C1-Beton wie auf den Baustellen *(KW I)* und *(KW II)* aus Tabelle 5.2 betrachtet. In der Tabelle wird dabei sowohl für *(KW I)* und *(KW II)* die Materialbezeichnung sowie die zugehörige Einwaagemenge während des gesamten Baustellenbetriebs in Tonnen dargestellt. Zusätzlich sind die Einwaagen im Mittel pro Charge in Tonnen gegeben sowie die zugehörige Streubreite der Einwaagen, gegeben durch die Standardabweichung. Geht man von einer Normalverteilung der Einwaagen aus, so liegen 68 % der Einwaagewerte im Intervall von der Breite von zwei Standardabweichungen.

			Gesamteinbau	Pro Charge		Normiert	Schwankung	
		Menge	mean	std	mean	std	std	
Bau-	Beton-	Material	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2
stelle	sorte		[t]	[t]	[t]	[kg/m3]	[kg/m3]	[%]
KW I	C1	0/2	5938.47	1.47	0.06	583.91	21.82	3.74
		16/22	6489.56	1.60	0.09	636.35	37.07	5.83
		2/8	3242.86	0.80	0.01	319.17	5.33	1.67
		8/16	5401.28	1.34	0.02	531.61	8.12	1.53
		CEM 1 42,5	3524.72	0.87	0.01	346.93	6.17	1.78
		LP	17.15	0.00	0.00	1.69	0.30	17.51
		VZ	0.53	0.00	0.00	0.70	0.02	2.24
		W2	899.11	0.22	0.02	88.22	9.68	10.97
KW II	C1	0/2	4109.36	1.48	0.03	615.36	9.77	1.59
		16/22	4487.90	1.62	0.01	672.09	5.61	0.83
		2/8	2241.73	0.81	0.01	335.70	5.30	1.58
		8/16	3721.53	1.34	0.00	557.32	4.52	0.81
		CEM 1 42,5	2425.48	0.87	0.02	362.97	9.21	2.54
		LP	10.87	0.00	0.00	1.63	0.36	22.15
		VZ	4.85	0.00	0.00	0.73	0.03	4.03
		W2	619.13	0.22	0.02	92.65	7.46	8.06

Tabelle 5.2: Vergleich Rezept C1 für KW I und KW II

Im Falle des Materials "Sand 0/2" für (KW I) ließen sich die Werte des Mittelwerts (mean) und der Standardabweichung (std) dann so darstellen, dass 68 % der Einwaagen einen Wert innerhalb von 1.47 t ± 0.06 t annehmen. Diese Darstellung ist zur besseren Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Chargengrößen zudem normiert auf eine 1 m3 Charge dargestellt mit 583.91 kg ± 21.82 kg. Dies entspricht einer Variation von ca. 3.75 % um den Mittelwert. Die prozentuale Abweichung bietet dabei meist ein eindeutigeres und einfacher zu interpretierendes Maß der Schwankung als die Betrachtung der Absolutwerte.

Eine Beschreibung der aufgelisteten Materialien kann Tabelle 5.3 entnommen werden. In Ergänzung zu Sand und Kies verschiedener Korngrößen wurden in Wittlich zwei verschiedene Zementarten (CEM 1 und CEM 2) eingesetzt. Als Zugabemittel wurde zudem ein Luftporenbildner (LP) eingesetzt sowie je nach Bedarf bei einzelnen Chargen auch Verzögerer (VZ) und Fließmittel (FM). Des Weiteren spielt die Menge an eingemessenem Wasser (W2) eine zentrale Rolle für die Betonrezeptur.

Material	Beschreibung		Material	Beschreibung		
0/2	Sand 0/2		CEM 1 42,5	Zement CEM 1		
0/4	Sand 0/4		CEM 2 A-S	Zement CEM 2		
16/22	Kies 16/22		LP	Zugabe: Luftporenbildner		
2/5	Kies 2/5		VZ	Zugabe: Verzögerer		
2/8	Kies 2/8		FM	Zugabe: Fließmittel		
5/8	Kies 5/8		W2	Wasser		
8/16	Kies 8/16					

Tabelle 5.3: Materialbeschreibung

Die Ergebnisse der Standardabweichung sind zur besseren Interpretierbarkeit in Abbildung 5-18 visualisiert. Die Einwaagen streuen dabei in KW I für Sand und Kies relativ gering um bis zu 6%. Die Einwaage des Zements weist eine Standardabweichung von unter 2 % auf. Lediglich der Wassergehalt schwankt um ca. 11 %. Die relativ große Schwankung des Wassergehalts liegt wahrscheinlich an den hohen bzw. wechselnden Temperaturen während des Einbaus sowie der Bewässerung der Gesteine und des Sands. Je nachdem ob eine Charge in gut bewässertem Zustand von der Halde entnommen wurde oder in trockenem Zustand ändert sich die noch zugegebene Menge an Wasser, welche meist vom Mischmeister angepasst wird. Zudem zeigt sich eine recht hohe Variation von über 17 % im Luftporenbildner. Dessen Dosierung muss ebenso an die eindosierte Wassermenge bzw. die Umgebungsbedingungen angepasst werden. Aufgrund der hohen Temperaturen musste in einigen Chargen zudem Verzögerer beigemischt werden, auch wenn der Transportweg relativ kurz war. Die Zugabemenge schwankte dabei aber auch gering mit 3 %.



Abbildung 5-18: Vergleich der Standardabweichungen für KW I und KW II (C1)

Abbildung 5-18 zeigt zudem den Vergleich der Schwankungen auf der Baustelle (*KW I*) mit dem Folgelos (*KW II*). Hierbei ist zu sehen, dass die Schwankungen der Sand- und Kiesmengen in (*KW II*) mit unter 2 % deutlich reduziert werden konnten. Die Standardabweichung der Wassereinwaage reduzierte sich ebenso von 11 % auf 8 % und die Schwankung des Zementgehalt erhöhte sich nur geringfügig. Die Dosierung der Zusatzmittel variiert auch in (*KW II*) deutlicher. Dies ist verständlich, da relativ wenig Zusatzmittel dosiert wurden sowie z.B. Verzögerer nur bei wenigen Chargen überhaupt eingewogen wurde. Zudem ist die exakte Zugabemenge von Temperatur- und Wetterschwankungen über den Tag hinweg abhängig, wie in Kapitel 5.1.2.3 detaillierter dargestellt wird.

Ähnlich können die von der Mischanlage erhobenen Dosierungen für die Baustellen (*Wi I*) und (*Wi II*) analysiert und dargestellt werden. Dabei sind in Tabelle 5.4 zunächst die Zusammensetzung der Rezeptur sowie die Einwaagen des Unterbetons dargestellt. Im Unterschied zu (*Wi I*) wurde das Rezept des UB für (*Wi II*) angepasst. Dadurch ergeben sich leichte Unterschiede bei der Korngröße des Sands (0/2 zu 0/4) und Kies (2/8 zu 2/5) sowie des verwendeten Zements (CEM 2 zu CEM 1). Anhand der mittleren Einwaagemengen für eine 1 m³ Charge Beton kann jedoch festgestellt werden, dass die Rohstoffe auf den Baustellen in einer vergleichbaren Menge zugegeben wurden. So wurden z.B. in (*Wi I*) im Mittel 567 kg/m³ an Sand 0/2 verwendet und in (*Wi II*) 600 kg/m³.

Dementsprechend ist in Abbildung 5-19 ebenso ein Vergleich der Standardabweichungen im UB zwischen (*Wi I*) und (*Wi II*) dargestellt. Für beide Baustellen liegen die Variationen der Einwaage von Sand und Kies unter 4 %. Größere Variationen zeigen sich bei der Einwaage des Zements (< 7 %) und des Wassers (< 11 %) aufgrund der erforderlichen Anpassung an die Wetter- und Rohstoffbedingungen.

			Gesamteinbau	Pro Charge		Normiert	auf 1m ³	Schwankung
			Menge	mean	std	mean	std	std
Bau-	Beton-	Material	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2
stelle	sorte		[t]	[t]	[t]	[kg/m3]	[kg/m3]	[%]
Wi I	UB	0/2	4461.62	1.39	0.035	566.90	20.39	3.60
		16/22	5235.65	1.63	0.025	665.25	19.93	3.00
		2/8	2570.25	0.80	0.016	326.56	10.25	3.14
		8/16	4255.71	1.33	0.006	540.75	14.62	2.70
		CEM 2 A-S	2805.50	0.87	0.038	355.81	18.12	5.09
		LP	15.00	0.00	0.000	1.91	0.18	9.62
		VZ	5.16	0.00	0.000	0.67	0.12	17.32
		W2	752.13	0.23	0.026	95.32	10.73	11.26
Wi II	UB	0/4	9369.40	1.42	0.022	599.82	7.78	1.30
		16/22	10532.30	1.60	0.041	674.31	18.02	2.67
		2/5	4416.80	0.67	0.022	282.74	8.19	2.90
		8/16	9081.23	1.38	0.043	581.39	18.05	3.10
		CEM 1 42,5	5754.93	0.87	0.060	365.94	25.49	6.97
		LP	44.72	0.01	0.001	2.84	0.40	14.23
		VZ	8.77	0.00	0.000	0.56	0.04	6.68
		W2	1774.15	0.27	0.019	113.58	8.10	7.13

Tabelle 5.4: Vergleich Rezept UB für Wi I und Wi II


Abbildung 5-19: Vergleich der Standardabweichungen für (Wi I) und (Wi II) (UB)

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim Oberbeton in (*Wi I*) und (*Wi II*), wie dies in Tabelle 5.5 dargestellt ist. Auch hier wurde das Rezept leicht modifiziert. Anhand von Abbildung 5-20 zeigt sich, dass die Schwankungen für Sand, Kies, Zement und Wasser in derselben Größenordnung wie für den Unterbeton beschrieben liegen. Einzig auffällig ist die große Streuung des Fließmittels für (*Wi I*) und des Verzögerers für (*Wi II*) von über 40 %. Da jedoch wie zuvor beschrieben nur wenige Chargen mit FM und VZ gefahren wurden sowie die Gesamtmenge an FM und VZ mit 4 t und 3 t im Vergleich zu > 1.000 t Gestein und Zement relativ gering ist, sind größere Schwankungen zu erwarten und stark von den Umgebungsbedingungen während des Einbaus abhängig.

			Gesamteinbau	Pro Charge		Normiert auf 1m ³		Schwankung	
			Menge	mean	std	mean	std	std	
Bau-	Beton-	Material	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	M1&M2	
stelle	sorte		[t]	[t]	[t]	[kg/m3]	[kg/m3]	[%]	
Wil	OB	0/2	2130.54	1.50	0.029	590.92	10.39	1.76	
		2/8	4409.34	3.11	0.017	1223.04	11.53	0.94	
		CEM 2 A-S	1487.04	1.05	0.062	411.02	24.43	5.94	
		FM	3.99	0.00	0.001	1.11	0.49	44.32	
		LP	8.34	0.01	0.001	2.31	0.30	13.19	
		VZ	2.48	0.00	0.000	0.82	0.06	7.05	
		W2	468.25	0.33	0.034	129.28	13.01	10.06	
Wi II	OB	0/4	2965.01	1.43	0.036	609.23	14.79	2.43	
		5/8	6619.56	3.20	0.072	1359.52	31.26	2.30	
		CEM 1 42,5	2172.36	1.04	0.101	440.20	43.17	9.81	
		LP	14.25	0.01	0.001	2.90	0.45	15.37	
		VZ	3.16	0.00	0.001	0.65	0.31	48.22	
		W2	723.43	0.35	0.024	148.42	10.05	6.77	

Tabelle 5.5: Vergleich Rezept OB für (Wi I) und (Wi II)

Die zuvor gezeigten Statistiken zeigen erstmals anhand von realen Baustellendaten, in welcher Größenordnung die Einwaage der Rohstoffe liegen und mit welchen wetter-, lager- und produktionsbedingten Schwankungen zu rechnen ist. Diese Ergebnisse können zum einen dazu genutzt werden, vorkommende Rezeptschwankungen bei Analysen im Labor besser nachvollziehen zu können, sowie Untersuchungen durchzuführen, inwiefern solche Variationen einen Einfluss auf die Produktqualität haben.



Abbildung 5-20: Vergleich der Standardabweichungen für (Wi I) und (Wi II) (OB)

Generell zeigt sich jedoch, dass gerade bei Sand und Kies relativ geringe Standardabweichungen von unter 3 % erzielt werden. Wie bereits in Gesprächen von den Mischmeistern und den Baustellenbeteiligten erläutert, treten die größten Variationen vor allem bei der Wassereinwaage (7-12 %) auf. Die Wasserzugabe muss im realen Betrieb aufgrund sich ändernder Kornfeuchten der Gesteinskornfraktionen (Sand und Kies), z.B. infolge der erforderlichen Bewässerung oder den vorherrschenden Wettereinflüssen, angepasst werden. Die Gesamtmenge des Wassers im Rezept ändert sich dabei jedoch effektiv nicht, sondern das Wasser kann im regelungstechnischen Sinne als nur teilweise messbare Störgröße aufgefasst werden. Feuchtemesssensorik in der Mischanlage hilft dabei, die Feuchte zu bestimmen. Aufgrund der komplexen Kalibrierung und schwierigen Platzierung der in den Mischanlagen verfügbaren Sensoren, konnten jedoch auf den ersten Baustellen keine verlässlichen Feuchtemessdaten aufgezeichnet werden. In Wittlich II *(Wi II)* wurde dies verbessert. Von dieser Baustelle liegen Feuchtemessdaten vor, die ausgewertet werden konnten.

5.1.2.2 Mischvorgang

Abbildung 5-21 zeigt eine Übersicht über die Kenngrößen, wie sie während eines Mischvorgangs am Beispiel eines gut verlaufenden Mischvorgangs auf der Baustelle Köln-Wahn aufgezeichnet werden konnte. In a) ist die Motorleistung einer Mischerwelle über die Zeit des Mischvorgangs aufgetragen. Die aufgezeichnete Leistung (blau) zeigt charakteristische überlagerte Schwingungen, welche von der Drehzahl und Position der Mischpaddel abhängen. Diese charakteristische Frequenz zeigt sich insbesondere bei einer Frequenzanalyse, wie in d) dargestellt, deutlich. Der erste Frequenzpeak liegt dabei genau bei der Mischfrequenz von 20 U/min. Weitere Peaks stellen das Vielfache dieser Mischfrequenz dar. Nach Elimination dieser Frequenzen ergibt sich in a) der in orange dargestellte typische Verlauf der Mischerleistung, wie er über Verlauf eines gesamten Mischprozesses hinweg aufgenommen wurde. Anhand der Pegelsignale der Verschlüsse in b) kann eine Klassifikation der Mischphasen in Beschicken, Mischen und Leeren erfolgen. Dies ist in c) dargestellt. Insgesamt zeigt sich in diesem Beispiel, dass durch Beschickung und Entleerung bereits etwa 40 s vergehen. Die reine Mischdauer beträgt dabei in etwa 63 s. Das eigentliche Mischen nimmt folglich ca. 2/3 der Zeit des gesamten Mischvorgangs ein. Diese Darstellung spiegelt einen Verlauf der Mischerleistung wieder, wie er grundsätzlich gewünscht wird.



Abbildung 5-21: Exemplarische Kenngrößen und Ablauf einer "idealen" Mischung (Mischer 1, Köln-Wahn, 27.06.2018)

Im Baustellenalltag zeigt sich jedoch häufig, dass ein "idealer" Mischvorgang nicht immer erreicht werden kann. Im Folgenden werden dazu zwei Beispiele gezeigt, welche die typischen Probleme des Mischens verdeutlichen. So zeigt Abbildung 5-22 eine beispielhafte Mischung eines Mischers, die am gleichen Einbautag erforderte, die Betonkonsistenz durch eine Wassernachdosierung nachzusteuern. In diesem Fall erforderte die Beschickung eine Dauer von 19 sec und die Entleerung 15 sec. Die Mischdauer liegt mit 85 sec jedoch deutlich höher als die angepeilten 60 sec eines "idealen" Mischverlaufs. Wie am grünen Signalverlauf in Darstellung b) zu erkennen, wird nach ca. 53 sec Wasser nachdosiert. Dies entspricht einer Mischdauer von etwa 35 sec. Die Nachdosierung erfolgt nach aktuellem Stand der Technik manuell durch den Mischmeister, welcher die Konsistenz des Betons durch seine Erfahrung einschätzt. In Vorbereitung auf AP B1 können jedoch erste Effekte im Verlauf der Mischerleistung festgestellt werden. Die Mischerleistung steigt während der Beschickung zunächst stark an. Nach etwa 12 sec wird eine Leistungsspitze erreicht. Im Anschluss sinkt die Mischerleistung annähernd linear bis zu einer "Mischendleistung" wieder ab. In diesem Fall sollte eine Mischendleistung von etwa 45 bis 50 kW erreicht werden, welche für eine "gute" Mischung identifiziert wurde. Im Falle der Baustelle Köln-Wahn sollte diese nach ca. 60 sec Mischdauer erreicht werden. Durch Änderungen der Rohstoffe und vor allem deren Feuchte kann es jedoch zu Schwankungen kommen. Es ist zu erkennen, dass die Mischerleistung zwischen 25 sec und 53 sec relativ konstant bei etwa 60 kW bleibt und nicht auf 50 kW absinkt. Diese Abweichung wurde in diesem Fall vom Mischmeister erkannt und durch behutsame Wassernachdosierung ausgeregelt. Die Wassernachdosierung erfolgt dabei schrittweise, um eine zu wässrige Konsistenz, welche sich z.B. durch eine Mischerendleistung von weniger als 45kW zeigen würde, zu vermeiden. Diese müsste dann zeitintensiv durch Nachdosierung von Gestein, Sand, und/oder Zement ausgeglichen werden.



Abbildung 5-22: Exemplarische Kenngrößen und Ablauf einer Mischung mit Nachdosierung (Mischer 1, Köln-Wahn, 27.06.2018)

Anhand dieses Beispiels zeigt sich, dass eine frühzeitige Kenntnis der Stoffeigenschaften der Materialien, und in diesem Zusammenhang insbesondere auch deren Feuchte, die Mischzeit verringern kann. Durch genauere Kenntnis der Feuchte der Gesteinskornfraktionen könnte bereits bei der Zugabe die Wasserzugabe den Anforderungen gerecht angepasst werden. Eine Nachdosierung lässt sich bei präziser Berücksichtigung der Gesteinskornfeuchten vermeiden. Dies setzt jedoch voraus, dass die verwendeten Gesteinskörnungen und Kornfeuchtegehalte über den gesamten Dosierprozess hinweg genau bekannt sind und deren Änderungen während der Entnahme aus den Siloboxen in ausreichender Genauigkeit erfasst werden können. Wie in AP A1.1 erwähnt, ist dies insbesondere bei der Feuchtemessung zurzeit nicht gegeben. In diesem Zusammenhang wurden im Verbundvorhaben von den Partnern Fa. Liebherr und IWB Analysen zur Frage, welche Feuchtesensorik ist für die Feuchtebestimmung zielführend und wie und mit welchen Kenngrößen müssen die zum Einsatz kommenden Feuchtemessverfahren in den Mischprozess eingebunden werden, um die Aussagefähigkeit zum Feuchtegehalt der Gesteinskörnungen verbessern zu können.



Abbildung 5-23: Exemplarische Kenngrößen und Ablauf einer Mischung mit Wartezeit aufgrund Transportkette (Mischer 1, Köln-Wahn, 27.06.2018)

Neben den Herausforderungen zur Feuchtemessung und den Bewertungen der manuellen Konsistenzregelung durch den Mischmeister, tritt im realen Baustellenbetrieb ein weiteres Problem auf: die Übergabe an und die Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen zum Ende des Mischvorgangs.

In Abbildung 5-23 ist ein Mischvorgang dargestellt, der auf den ersten Blick gut verläuft, da die Mischerleistung nach 60 sec Mischdauer bereits auf ca. 47 kW absinkt. Jedoch kann der Mischer zu diesem Zeitpunkt nicht entleert werden, da kein Transportfahrzeug verfügbar ist. Dementsprechend wird die Mischanalage weiter betrieben, solange bis ein Fahrzeug zur Verfügung steht. In dem beobachteten Fall kann erst nach weiteren 3 Minuten Mischdauer der Mischer entleert und das Fahrzeug beladen werden. Auch wenn die Mischerleistung vermutlich nach 60 s bereits einen guten und vergleichbaren Wert von ca. 45kW erreicht, so senkt sich die Mischerleistung durch den langen Mischvorgang bis zum Entleeren weiter auf etwa 35kW. Eine längere Mischung führt an sich zu einer besseren Vermischung. Allerdings verändert sich dadurch auch die Konsistenz und der Beton ist eventuell nicht mehr vergleichbar zu den weiteren Mischungen.

Dieses Beispiel verdeutlicht aber auch, dass die geforderte gleichförmige Eigenschaft des Frischbetons nicht sicher gewährleistet werden kann, da der Aufschluss aller Feinstoffe und deren Homogenisierung im Laufe des Mischprozesses nicht abschließend erfolgen konnte. Erst mit einer deutliche Erweiteurng der Mischzeit kommt es also zu einer vollständigen Vermischung aller Bestandteile, die einen robusten Beton sicherstellen würde.

Dennoch verdeutlicht dieses Beispiel, dass eine Abstimmung der Mischanlage auf die Transportkette notwendig und hilfreich ist. In einem ersten Schritt könnte dabei die Kenntnis der Position der Transportfahrzeuge sowie eine erwartete Ankunftszeit an der Mischanlage Abhilfe schaffen, um dieses Problem zu vermeiden. Erst wenn sichergestellt ist, dass ein Transportfahrzeug den Beton auch aufnehmen kann, sollte der Mischvorgang gestartet werden. Auf der anderen Seite müssen aber auch die engen Verflechtungen auf einer Baustelle berücksichtigt werden. So ist es sinnvoll, dass ein Transportfahrzeug erst dann mit Beton befüllt wird, wenn der Beton auch am Fertiger benötigt wird und eingebaut werden kann. Dies zeigt, dass alle Teilnehmer der Baustelle idealerweise miteinander zu verknüpfen sind und einen Austausch zwischen den Prozessschritten notwendig ist. Dies kann z.B. durch ein zentrales Leitsystem erreicht werden, welches in AP C beschrieben ist.



Abbildung 5-24: Übersicht über Produktionsleistung an einem exemplarischen Tag.

Neben einzelnen Mischungen wurden im Zuge der Baustellenanalysen ebenso ganze Einbautage bzw. Einbauzeiträume betrachtet und eingehend analysiert. Exemplarisch ist in Abbildung 5-24 dazu die Produktionsleistung der beiden mobilen Mischanlagen der Baustelle Köln-Wahn am 27. Juni 2018 dargestellt. Beide Mischer der Mischanlage produzierten an diesem Tag 130 Mischungen. Innerhalb der 5 Stunden Einbau lag die Ausstoßleistung der Mischer bei jeweils 60 Kubikmeter pro Stunde. Ein LKW transportiert dabei jeweils 4 Chargen, also 2 Chargen von jedem Mischer. Dadurch schwankt die Ausstoßleistung zwischen 20 m³/h (kein LKW verfügbar/Wartezeit zwischen LKWs) und 150 m³/h (LKW verfügbar/2 Chargen direkt nacheinander).

5.1.2.3 Dosierung und Einwaage der Rohstoffe

In Ergänzung zur Übersicht der Produktionsleistung und -verteilung, wie sie über den Tag hinweg beobachtet werden konnte, wurden ebenso statistische Daten zur Dosierung der einzelnen Rohstoffe erfasst und ausgewertet. Im Falle der Baustelle Köln-Wahn wurde von beiden Mischern die meiste Zeit ein C1-Beton gefertigt. Für die Handfelder wurde zusätzlich F2-Beton produziert. Für die Baustelle Wittlich muss zusätzlich zwischen Oberbeton (OB) und Unterbeton (UB) unterschieden werden.



Abbildung 5-25: Histogramme zur Verteilung der Gesamtchargengröße für Köln-Wahn (links) und Wittlich (rechts)

Abbildung 5-25 zeigt eine Übersicht des Gesamtvolumens der Mischer über den gesamten Einbauzeitraum. Das gewünschte Volumen (spec) betrug dabei in beiden Fällen 2.5 m³. Dieses wird in beiden Fällen gut eingehalten mit kleineren Abweichungen (<4%) bei Mischer 1 für die Fertigung des UB in Wittlich (tatsächlich gemessene Einwaagen mit "act" bezeichnet). Insgesamt wurden in *(KW I)* ca. 4.200 Chargen gemischt. In Wittlich *(Wi I)* wurden während des aufgezeichneten Zeitraums etwa 1.200 Chargen OB und 3.500 Chargen UB gefertigt. Dies ist konsistent zur Verteilung der Einbaustärke (6 cm OB zu 20 cm UB).



Abbildung 5-26: Verteilung der Chargengröße einer Mischung für den C1-Beton der Baustelle **KW I**, aufgeteilt in Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts).

Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-29 zeigen die Verteilung der Chargengrößen nochmals detaillierter für alle 4 Baustellen für Mischer 1 und für *(KW I)* und *(KW II)* exemplarisch auch für Mischer 2. Bis auf *(KW I)* ist gut erkennbar, dass sich annähernd eine Normalverteilung um den Vorgabewert ergibt. Lediglich in *(KW I)* zeigen sich zwei Maxima. Dies deutet an, dass ein Teil der Mischungen auf beiden Mischanlagen mit einer minimal höheren Batchgröße von 2.53 m3 gefahren wurde, was den Prozess an sich jedoch nicht nennenswert zu beeinflussen scheint.



Abbildung 5-27: Verteilung der Chargengröße einer Mischung für den C1-Beton der Baustelle **KW II**, aufgeteilt in Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts).



Abbildung 5-28: Verteilung der Chargengröße einer Mischung für den UB (links) und OB (rechts) der Baustelle **Wi I**, jeweils für Mischer 1



Abbildung 5-29: Verteilung der Chargengröße einer Mischung für den UB (links) und OB (rechts) der Baustelle **Wi II**, jeweils für Mischer 1

Die Daten der Baustelle (KW I) werden exemplarisch auf die Verteilungen der Einwaagegrößen der Gesteinskörnungen und sonstigen Betonkomponenten heruntergebrochen, um zu zeigen, welche Rückschlüsse und Analysen mithilfe der erfassten Messdaten gezogen werden können. Dazu ist in Abbildung 5-30 für die Gesteinskornfraktionen (Sand und Splitte) sowie in Abbildung 5-31 für Wasser und Zement dargestellt, wie sich die Einwaagen pro Charge C1 Beton über den gesamten Baustellenzeitraum verhalten. In Abbildung 5-26 wurde festgestellt, dass die Chargengröße auf der Baustelle zwei Maxima beinhaltet und damit aus zwei überlagerten Normalverteilungen zu bestehen scheint. Dabei zeigt Abbildung 5-30 detaillierter, woher diese Unterschiede kommen. Während die Einwaagen von Sand und des Splitts mit der Korngröße 2/8 annähernd normalverteilt sind, zeigen sich bei der Einwaage der gröberen Kornfraktionen 8/16 und 16/22 zwei Häufungen. D.h. es wurde während der Baustelle vermutlich mit 2 leicht unterschiedlichen Gesteinskorneinwaagen von 1.310 kg und 1.570 kg bzw. 1.345 kg und 1.620 kg gefahren.



Abbildung 5-30: Histogramme der Einwaagen Sand und Kies des C1 Betons für (KW I) und Mischer 1.



Abbildung 5-31: Histogramme der Einwaagen Wasser und Zement des C1 Betons für (KW I) und Mischer 1.

Des Weiteren sind in Abbildung 5-32 die Verteilungen des Luftporenbildners sowie des Verzögerers aufgetragen. Während der Luftporenbildner bei allen Chargen hinzugefügt wurde (n = 1.984), musste Verzögerer nur in ca. 7,5 % der Fälle (148 Chargen) zugegeben werden. Dabei zeigt sich, dass der Anteil an Luftporenbildner zwischen 3 kg und knapp 8 kg pro Charge schwankte, wobei die meiste Zeit mit zwischen 3 und 4,7 kg gefahren wurde.



Abbildung 5-32: Histogramme der Einwaagen Luftporenbildner (links) und Verzögerer (rechts) des C1 Betons für KW I und Mischer 1.

Analog dazu sind die Einwaagen des Luftporenbildners und Verzögerers in Abbildung 5-33 für *(KW II)* dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass verschiedene Häufungen des LP auftreten. Im Gegensatz zu *(KW I)* wurde in *(KW II)* jedoch in fast allen Chargen Verzögerer beigemischt.



Abbildung 5-33: Histogramme der Einwaagen Luftporenbildner (links) und Verzögerer (rechts) des C1 Betons für **KW II** und Mischer 2.

Zur Vollständigkeit ist in Abbildung 5-34 zusätzlich die Verteilung des Fließmittels im OB in (*Wi I*) dargestellt. Hier zeigt sich deutlich, dass die Menge an FM in ganzzahligen Schritten manuell angepasst wurde. Dadurch, dass für die Berechnung der Standardabweichung in Kapitel 5.1.2.1 eine Normalverteilung angenommen wurde, für den LP um FM Wert jedoch verschiedene Häufungen auftreten, ist ersichtlich, dass die prozentuale Schwankung des LP-, FM-, und VZ-Werts mitunter relativ hoch ist.



Abbildung 5-34: Histogramm des Fließmittels für den OB in (Wi I)

Bei der Analyse der Zugabemengen zeigt sich ebenso die Thematik des Feuchtegehalts der Rohstoffe. In Abbildung 5-35 sind die Verteilungen der Wassereinwaagen für *(KW I), (KW II), (Wi I)* und *(Wi II)* nochmals zusammengefasst dargestellt. Dabei zeigt sich, wie zuvor bereits beschrieben, dass die Wassermenge sich zwar um einen Nominalwert bewegt, jedoch oftmals eine relativ breite Streuung von 5-10 % gegeben ist. Für den UB in *(Wi I)* (e) zeigt sich z.B. ein Maximum bei ca. 220 kg, aber auch bei 250 kg und 265 kg.

Als Ursachen für die ungleichmäßige Zugabe von Wasser können wechselnde Feuchtegehalte der Gesteinskornfraktionen sein. Insbesondere die feinere Kornfraktion (Sand) und die stark wechselnden Witterungsverhältnisse auf den Baustellen, wie z.B. die sich im Tagesgang verändernden Temperaturverhältnisse oder die sich im Tages-, Wochen- oder Jahresverlauf sich stark verändernden Witterungsrandbedingungen zwischen Sonne und starken Niederschlägen, sind hier zu nennen. Weitere Gründe für die Schwankungen können auch Nachlieferungen der Ausgangsstoffe sein, so dass das auf der Halde gelagerte Material stets andere Feuchtegehalte aufweist.

Aufgrund der automatischen Erfassung und Weiterverarbeitung aller verfügbaren Prozessdaten der Mischanlage könnten diese von einem digitalen Leitstand für Statistiken zum Mischbetrieb genutzt werden oder könnten auch für eine Optimierung der Mischprozessführung genutzt werden. Dadurch könnten Abweichungen vom Sollbetrieb frühzeitig erkannt und ggf. mit geeigneten Gegenmaßnahmen darauf reagiert werden. Eine grafische Aufbereitung der Daten könnte es den Baustellenbeteiligten zudem ermöglichen, frühzeitig und gezielter auf den Mischprozess nachteilig beeinflussende Änderungen zu reagieren.



Abbildung 5-35: Wasserdosierung in (a) KW I, (b) KW II, (c) Wi I OB, (d) Wi II OB, (e) Wi I UB und (f) Wi II UB

5.1.2.4 Zugabestoffe – Zeitpunkt und Dauer

Neben der initialen bzw. gesamten Einwaage spielt ebenso die Dosierung und insbesondere die Nachdosierung eine wichtige Rolle. In diesem Falle wird insbesondere die Nachdosierung des Wassers statistisch analysiert. Abbildung 5-36 bis Abbildung 5-39 zeigen die Verteilung der Wassernachdosierung für *(KW I), (KW II), (Wi I)* und *(Wi II)*.

Wie im Falle von *(KW I)* in Abbildung 5-36 dargestellt, verhalten sich die Nachdosierungen von Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts) ähnlich. In ca. mehr als 50% der Fälle, z.B. in knapp 1.200 von 1.984 Chargen bei Mischer 1, musste kein Wasser nachdosiert werden. Sofern Wasser nachdosiert wurde, lag die Wassermenge meist unter 20 kg, was einer Abweichung von weniger als 10% bezogen auf die Gesamtdosierung von Wasser von ca. 220 kg entspricht.



Abbildung 5-36: Wassernachdosierung in KW I für Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts)

Analog dazu ist die Wassernachdosierung für *(KW II)* in Abbildung 5-37 dargestellt. Als erstes fällt auf, dass in deutlich weniger Fällen Wasser nachdosiert werden musste. Für beide Mischer wurde in weniger als 20 % der Chargen Wasser hinzugefügt. In *(KW I)* waren es noch mehr als 40% der Chargen. Sofern nachdosiert werden musste, lag die Menge in der Regel bei weniger als 10 kg anstatt 20 kg wie bei *(KW I)*. Dadurch zeigt sich, dass sich der Prozessablauf bzw. das Verständnis der Mischanlage von *(KWI)* zu *(KW II)* hin deutlich verbessert hat. In *(KW I)* kam die MobilMix-Mischanlage zum ersten Mal zum Einsatz. Dementsprechend waren auch größere Schwankungen aufgrund der Inbetriebnahme erwartet worden. Zusätzlich kann die das häufige Erfordernis einer Nachdosierung von natürlich sich ändernden Umgebungsbedingungen verursacht gewesen sein, welche ggf. in *(KW II)* gleichmäßiger waren.



Abbildung 5-37: Wassernachdosierung in KW II für Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts)



Abbildung 5-38: Wassernachdosierung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für Unterbeton (Mischer 1)

Eine geringe Nachdosierung zeigte sich ebenso für den Unterbeton auf den Baustellen (*Wi I*) und (*Wi II*), wie in Abbildung 5-38 dargestellt. Analog zu (*KW II*) wurde in weniger als 20 % der Fälle nachdosiert. Während in

(*Wi I*) noch eine relativ breite Streuung von mehr als 20 kg vorlag, wurden in (*Wi II*) nur sehr selten mehr als 10 kg Wasser während des Mischvorgangs hinzugefügt.

Lediglich im Falle des Oberbetons in Wittlich ist eine größere Streuung zu erkennen. In *(Wi I)* wurde bspw. in knapp 50 % der Chargen Wasser nachdosiert und in *(Wi II)* sogar in 65 % der Fälle, wie aus Abbildung 5-39 zu entnehmen ist. Diese starke Streuung tritt in beiden Fällen nicht beim Unterbeton sondern nur im Oberbeton auf. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Anforderungen an den Oberbeton generell höher als an den Unterbeton sind. Dadurch ist die zulässige Abweichung des Wassergehalts generell geringer, um gleichbleibende Einbaubedingungen zu gewährleisten. Dadurch müssen ggf. auch mehr umgebungsbedingte Schwankungen berücksichtigt werden, welche für die Qualität des Unterbetons weniger relevant sind. Zusätzlich beeinflussen eine ungleichmäßige Feuchte der feinen bis groben Gesteinskornfraktionen die Konsistenzschwankungen beim Einbau den Mischprozess.



Abbildung 5-39: Wassernachdosierung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für Oberbeton (Mischer 1)

5.1.2.5 Zugabestoffe – Verteilung

Die Verteilung der Ausgangsstoffe, insbesondere die Verteilung des Wassers im Mischer, hat einen signifikanten Einfluss auf die Qualität und Reproduzierbarkeit der Betone. Eine Analyse im Feld ist hierbei aufgrund der Rahmenbedingung nahezu nicht durchführbar. Entsprechend wird dieser Problematik neben empirischen Untersuchungen im Technikum und mittels entsprechender Versuche mit dem im Verbundvorhaben entwickelten Labormischer der Firma Liebherr betrachtet. Des Weiteren wurde auch eine modellbasierte Analyse hierzu vorgenommen. Die Erkenntnisse aus den Technikums- und Laborversuchen sowie die zugehörigen Simulationen werden im Arbeitspaket B und C vorgestellt.

5.1.2.6 Geometrie des Mischers

Die konstruktive Ausgestaltung des Mischers und der Mischwerkzeuge besitzt direkten Einfluss auf das Mischergebnis. In diesem Kontext werden im Labor und im Technikum erweiterte Versuchsreihen durchgeführt, um diesen Einfluss systematisch zu quantifizieren sowie die konstruktive Ausgestaltung zu optimieren, wie diese im Arbeitspaket B und C aufgezeigt werden.

5.1.2.7 Verschmutzungsgrad

Neben dem Verschmutzungsgrad des Mischers sowie dessen Werkzeuge wird durch Restwasser im Mischer nach der Reinigung die Reproduzierbarkeit des Mischergebnisses negativ beeinflusst. Entsprechend muss bei der Maschinenbedienung erhöhte Aufmerksamkeit auf diese Faktoren gelegt und kontinuierliche Wartungsund Reinigungsintervalle eingehalten werden. Die Baustellenanalysen zeigen, dass diese Faktoren im realen Betrieb nur bedingt eingehalten werden. Daher besteht die Notwendigkeit, diese Einflüsse systematisch zu erfassen und zu analysieren und auch bzgl. der Steuerung der Mischanlage in den Mischprotokollen aufzunehmen.

5.1.2.8 Leistung, Drehzahl des Mischers

Mischerdrehzahl, Leistung und Mischzeit können als weitere Kenngrößen für die Qualität und Gleichmäßigkeit des Mischvorgangs herangezogen werden. Im Falle der Baustellen Köln-Wahn I (*KW I*) und Wittlich I & II (Wi I) und (*Wi II*) wurde der Mischer mit einer konstanten Drehzahl der Mischerwelle von 20 U/min betrieben. Dies zeigt sich auch deutlich in der Frequenzanalyse in Abbildung 5-21. Beim Verlauf der Mischerleistung und der Mischdauer eines Mischansatzes über den Zeitraum eines Tages lassen sich hier deutliche Schwankungen erkennen. Ein exemplarisches Zeitfenster von einer halben Stunde ist in Abbildung 5-40 dargestellt. Es lassen sich Unterschiede in der Mischdauer, Mischleistung und den Standzeiten erkennen.



Abbildung 5-40: Ausschnitt aus den Zeitreihendaten eines Mischtages der Baustelle Köln-Wahn



Abbildung 5-41: Übersicht über Mischerleistung eines Einbautages (27.06.2018). a) alle Mischungen, b) Mischungen mit Endzeit zwischen 80s und 140s (93,2% bzw. 92,4% der Kurven liegen in diesem Bereich).

Die Verteilung der Mischdauer und Leistung ist in Abbildung 5-41 nochmals verdeutlicht. Hierbei wurden alle Mischungen, die am 27.06.2018 in Köln-Wahn gefahren wurden, ausgeschnitten und übereinandergelegt. Ausschnitt a) zeigt dabei sämtliche Mischungen aufgetrennt in Mischer 1 und Mischer 2, währenddessen b) nur Mischungen zeigt, die zwischen 80 s und 140 s dauerten. Während der Leistungsanstieg während der Beschickung eine gute Übereinstimmung zeigt, so variiert der Leistungsverlauf während des Mischvorgangs mitunter deutlich. Gründe dafür sind beispielsweise Unterschiede in der Feuchte, erforderliche Nachdosierungen und die fehlende Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen. Es zeigt sich jedoch auch, dass 93,2 % (Mischer 1) bzw. 92,4 % (Mischer 2) der Mischungen zwischen 80 sec und 140 sec dauern (siehe b)). Dadurch lässt sich die Streuung bereits deutlich reduzieren. Nach ca. 80 sec ergibt sich eine Streuung von ca. 21 kW, was einer Abweichung von ca. 21 % um den Mittelwert von 45 kW entspricht. Ausreißer, wie z.B. der relativ konstante

Verlauf der Mischerleistung von 70 kW, sind wahrscheinlich Testchargen zuzuschreiben. Da die Feuchtemesssensoren leider keine verwertbaren Signale lieferte, kann an dieser Stelle keine genauere Aussage zu den Gründen der Streuungen gegeben werden.

Um eine breitere Erfassung aller prozessrelevanten Daten zu ermöglichen wurden bei der gemeinsamen Baumaßnahme Wittlich II (*Wi II*) über die zusätzlichen elektrischen Kenngrößen auch die mechanischen erfasst. Dazu wurde das eingesetzte Messequipment um eine Drehmomenten- und Drehzahlmessung erweitert (vgl. Kapitel 5.1.2.9). Exemplarisch ist in Abbildung 5-42 der Verlauf der Mischer Leistung für Unterbeton bzw. für Oberbeton an der Baustelle Wittlich II (*Wi II*) dargestellt.



Abbildung 5-42: Messung Antriebsleistung, Wittlich II (Links: Unterbeton C30/37C1, Rechts: Oberbeton C30/37F2)

5.1.2.9 Drehmomentmessung und Drehzahlmessung am Antrieb

Die Beurteilung der Konsistenz des Betons im Mischer findet aktuell auf Basis des gemessenen Wirkleistungssignals statt. Dieses elektrische Leistungssignal P_{el} wird Anhand der Ankerströme des Mischermotors bestimmt. Für die Mischleistung P_{misch} gilt dabei

$$P_{misch} = P_{el} - V,$$

wobei V die elektrischen, magnetischen und mechanischen Verluste des Antriebstranges zusammenfasst. Um die Größe der Verluste abzuschätzen, wurde eine Messung der mechanischen Leistung des Antriebsstranges durchgeführt. Hierzu wurden anstelle der Drehmomentstützen der Mischerantriebe des DW2,5 Mischers zwei Kraftaufnehmer eingebaut (vgl. Abbildung 5-43). Diese erlauben die direkte Messung des durch die Antriebe eingebrachten mechanischen Moments T_{mech} . In Kombination mit der gemessenen Motordrehzahl ω ergibt sich somit die mechanischen Antriebsleistung

 $P_{mech} = T_{mech}\omega.$



Abbildung 5-43: Kraftaufnehmer am betrachteten DW 2,5 Mischer

Die Berechnung der Drehmomente erfolgte dabei auf Basis der Anbaugeometrie aus den gemessenen Kräften. Die Qualität des sich ergebenden Signals ist bezüglich Auflösung und SNR vergleichbar mit der aus der Strommessung erzeugten Wirkleistung. In Abbildung 5-44 werden beide Signale miteinander verglichen. Das Wirkleistungssignal liegt um die konstanten Wirkungsgradverluste oberhalb der Leistungsmessung am Getriebe Abgang. Die Qualität des Signals deckt sich jedoch.



Abbildung 5-44: Vergleich von Abtriebs Leistung und durch Drehmomentsensor gemessener Leistung

Eine Unabhängige Auswertung der Leistungssignale der beiden im Antrieb verbauten Motoren (vgl. Abbildung 5-43) zeigt beim Befüllen des Mischbehälters eine kurzzeitige einseitige Erhöhung des Drehmomentes (10%). Dies ist in Abbildung 5-45 dargestellt. Aufgrund dieser Asymmetrie ist eine Erfassung und Mittelung des mechanischen Wirkleistungssignals an beiden Antrieben notwendig.



Abbildung 5-45: Asymmetrie der Leistungsverteilung beim Befüllen des Mischers

In Abbildung 5-46 ist der prozentuale Anteil der mechanischen Leistung zum Wirkleistungssignal dargestellt. Es zeigt sich das die Verluste des Antriebsstrangs mit der Laufzeit abnehmen und damit der Wirkungsgrad mit der Laufzeit zunimmt. Ebenfalls ist zu sehen, dass der Wirkungsgrad in hohem Maße von der Leistung abhängt. So liegt dieser im Bereich einer Wirkleistung von 10 % gerade mal im Bereich von 10 %. Im Bereich der Nennleistung und der Nenndrehzahl des Motors erreicht der Wirkungsgrad einen Wert von bis zu 95 %.

Die direkte Messung des Drehmomentes bietet daher im Vergleich zur Messung der Wirkleistung den Vorteil unabhängig von der abgerufenen Leistung oder den sich im Betrieb ändernden Reibungsverlusten zu sein.



Abbildung 5-46: Vergleich der Wirkungsgrade von Drehmomenten und Wirkleistungsmessung

Eine Messung des Schlupfes im Riementrieb an der Anlage zeigt, dass es nur zu einem kaum Temperaturabhängigen Schlupf von etwa 0,2 % - 0,7 % kommt, dieser ist hauptsächlich lastabhängig (vgl. Abbildung 5-47).





5.1.2.10 Einfluss auf Qualitätsindikatoren

Die zuvor aufgezeigte Streuung der Daten kann in einem nächsten Schritt statistisch auch hinsichtlich Qualitätsindikatoren analysiert werden. Hierzu werden vier in der Mischanlage vorliegende Signale untersucht: Mischzeit, Mischerendleistung, w/z-Wert und Betontemperatur. Diese Parameter liefern an sich noch keine detaillierte Aussage über die Betonqualität, können jedoch als Indikatoren für eine gleichmäßige Herstellung bzw. vergleichbare Herstellungsbedingungen gesehen werden.

5.1.2.10.1 Mischzeit

Abbildung 5-48 und Abbildung 5-49 zeigen dazu zunächst die Verteilung der Mischdauer für (KW I) und (KW II). In der linken Grafik ist die Verteilung der Mischdauern für alle Chargen dargestellt. Es zeigt sich, dass in

seltenen Fällen bis zu 700 sec lang gemischt wurde. Rechts sind zur eindeutigeren Darstellung nur die Mischungen aufgezeigt, bei denen die Mischdauer 120 sec nicht übersteigt. Die Anzahl der Ausreißer, bei denen die Mischzeit länger als 120 sec betrug, kann z.B. anhand der Zahl der gezeigten Chargen n berechnet werden. Im Falle von (*KW I*) in Abbildung 5-48 sind dies 40 Chargen (n = 1.984 vs. n = 1.944). Gründe für solche längeren Mischdauern sind z.B. fehlende Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen an der Mischanlage oder die Durchführung von Testmischungen. Da diese Fälle Sonderfälle darstellen, wird im Folgenden vor allem der Bereich bis 120 s Mischdauer genauer analysiert.



Abbildung 5-48: Verteilung der Mischzeit in **KW I** jeweils für C1-Beton und Mischer 1. Links ist die Verteilung über alle Chargen aufgetragen und rechts beschränkt auf die Chargen mit einer Mischdauer von weniger als 120 s.

Im Falle der reinen Mischdauer (ohne Beschickung und Entleerung) zeigt sich, dass diese für *(KW I)* und *(KW II)* relativ konstant bei 60 sec liegt. Mehr als 55 % der Chargen wurden nach genau 60 sec entleert. Für *(Wi I)* und *(Wi II)* unterscheidet sich die Mischzeit je nach Betonsorte. Während der Oberbeton in Abbildung 4.51 ebenso durchschnittlich 60 sec lang gemischt wurde, betrug die Mischzeit für den Unterbeton nur 45 sec (Abbildung 5-50). Geringere Mischzeiten als die gewünschte – 60 sec für KW und Wi OB, 45 sec für Wi UB – sind vor allem bei den Baustellen *(KW I)* und *(Wi I)* (Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51 links), die 2018 stattfanden, zu erkennen. Bei den Baustellen in 2019 in *(KW II)* und *(Wi II)* (Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51 rechts) treten kaum kürzere als die gewünschte Mischzeit auf. Dies deutet darauf hin, dass die Erfahrung im Umgang mit der Mischanlage, welche in 2018 neu angeschafft wurde, über die Zeit zugenommen hat.



Abbildung 5-49: Verteilung der Mischzeit in **KW II** jeweils für den C1-Beton und Mischer 1. Links ist die Verteilung über alle Chargen aufgetragen und rechts beschränkt auf die Chargen mit einer Mischdauer von weniger als 120 sec.



Abbildung 5-50: Verteilung der Mischzeit in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den UB



Abbildung 5-51: Verteilung der Mischzeit in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB

In Abbildung 5-50 zeigt sich am Beispiel des Unterbetons in *(Wi I)*, dass die Mischzeit zwischen 45 sec und 55 sec liegt, wodurch zwei relativ große Peaks auftauchen. Um eindeutigere Kenngrößen zu erhalten, sind die Erkenntnisse in Tabelle 5.6 hinsichtlich des Mittelwerts (mean), der Standardabweichung (std) und der Standardabweichung in % bezogen auf den Mittelwert zusammengefasst.

		Mischzeit			Mischendleistung			w/z-Wert (rechnerisch)		
Bau-	Beton-	mean	std	std	mean	std	std	mean	std	std
stelle	sorte	[s]	[s]	[%]	[kW]	[kW]	[%]	[-]	[-]	[%]
KW I	C1	64.1	22.1	34.5	42.4	6.9	16.3	0.403	0.012	3.1
KW II	C1	71.7	38.3	53.4	54.2	10.0	18.4	0.398	0.017	4.3
KW I	F2	58.3	16.0	27.4	22.1	5.1	23.1	0.415	0.021	4.9
KW II	F2	95.9	18.9	19.7	24.3	5.6	22.9	0.400	0.018	4.5
Wi I	OB	67.0	21.0	31.3	29.5	11.5	38.8	0.452	0.020	4.5
Wi II	OB	64.0	8.7	13.5	26.7	5.8	21.8	0.438	0.010	2.3
Wi I	UB	51.0	21.6	42.3	62.4	14.3	23.0	0.405	0.018	4.3
Wi II	UB	49.1	10.2	20.8	56.5	7.5	13.3	0.425	0.007	1.7

Tabelle 5.6: Vergleich der Qualitätsindikatoren für KW I, KW II, Wi I und Wi II gemittelt über beide Mischer

Dabei zeigt sich, dass die Mischzeit des UB in (Wi I) bei ca. 51 sec lag, wohingegen in (Wi II) im Mittel 49 sec lang gemischt wurde. Für eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit kann zudem die Standardabweichung herangezogen werden, wobei diese im Falle der Mischzeit schwer zu bewerten ist, da hier keine Normalverteilungen vorliegen. Generell liegt die Standardabweichung für vergleichbare Baustellen und Betone im Jahr 2019 unter der im Jahr 2018. Lediglich bei (KW II) ist eine leicht höhere Abweichung festzustellen.

5.1.2.10.2 Mischerendleistung

Analog dazu zeigen Abbildung 5-52 bis Abbildung 5-54 die Endleistung des Mischers vor Entleeren und Tabelle 5.6 die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen. Die Mischerendleistung zeigt bei *(KW I)* den typischen Verlauf einer Gaußglocke um die mittlere Leistung von 42 kW und eine Standardabweichung (bezogen auf den Mittelwert) von ca. 7 kW (16 %). Ähnliche Werte ergeben sich für den UB auf der Baustelle *(Wi I)*. Der UB weist dort im Mittel eine Endleistung von 62 kW bei einer Standardabweichung von 14 kW (23 %) auf. Beim OB liegt der Mittelwert bei ca. 30 kW mit einer Standardabweichung von 11 kW (39 %). Damit scheint der UB eine bessere Gleichmäßigkeit der Endleistung aufzuweisen.



Abbildung 5-52: Verteilung der Mischendleistung in KW I (links) und KW II (rechts) jeweils für C1-Beton und Mischer 1

In Abbildung 5-53 zeigt sich dabei, dass auch teilweise die Mischanlagen eine unterschiedliche Endleistung aufweisen, was die Analyse erschwert. Während Mischer 1 in (*Wi I*) (Abbildung 5-53 oben links) ungefähr eine Mischendleistung von 58 kW aufweise, liegt diese beim Mischer 2 (Abbildung 5-53 unten links) im Mittel bei 65 kW. Im Gegensatz dazu liegt die mittlere Endleistung in (*Wi II*) beim Mischer 1 mit 61 kW höher als bei Mischer 2 mit 57 kW (Abbildung 5-53 rechts).

Auf der anderen Seite zeigt sich jedoch auch, dass sowohl für den UB als auch den OB die Streubreite von (Wi I) zu (Wi II) hin deutlich abnimmt. Während in (Wi I) noch eine Standardabweichung von 39 % für den OB und 23 % für den UB vorlagen, reduziert sich diese um knapp die Hälfte auf 22 % und 13 % in (Wi II), was auf eine erhöhte Gleichmäßigkeit der Fertigung, der Logistik oder der Rohstoffe schließen lässt.



Abbildung 5-53: Verteilung der Mischendleistung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den UB für Mischer 1 (oben) und Mischer 2 (unten)



Abbildung 5-54: Verteilung der Mischendleistung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB

5.1.2.10.3 w/z-Wert

Der Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) kann als weitere Kenngröße herangezogen werden. Abbildung 5-55 zeigt die Verteilung des in der Mischanlage rechnerisch ermittelten w/z-Werts über den gesamten Einbauzeitraum von (KW I) und (KW II). Kenngrößen dazu sind in Tabelle 5.6 zu finden. Der w/z-Wert liegt bei allen Baustellen im Mittel bei 0,4. Wie zuvor zeigt sich, dass die Variationen vor allem im Vergleich von (Wi I) zu (Wi II) verringert wurden. Während sowohl für UB als auch OB in (Wi I) noch Schwankungen größer 4% ermittelt wurden, sind diese mit ca. 2 % des Mittelwerts in (Wi II) deutlich geringer. Da der w/z-Wert jedoch nicht gemessen, sondern rein rechnerisch aus den Zugabemengen ohne Berücksichtigung der Feuchte bestimmt wird, kann die Abweichung in der Realität auch geringer sein und die Bandbreite durch die Streuung bei der Feuchte der Rohstoffe zustande kommen. Im Zusammenhang mit der geringeren Bandbreite der Endleistungen lässt sich jedoch darauf schließen, dass die Gleichmäßigkeit der Betonherstellung von (Wi I) nach (Wi II) erhöht wurde.



Abbildung 5-55: Verteilung des w/z-Werts für KW I (links) und KW II (rechts) für den C1 Beton und Mischer 1



Abbildung 5-56: Verteilung des w/z-Werts für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den UB



Abbildung 5-57: Verteilung des w/z-Werts für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB

5.1.2.10.4 Betontemperatur

Im Zusammenhang mit Einflussfaktoren auf die Betonqualität und Gleichmäßigkeit sei hier ebenso auf die Temperaturverteilung verwiesen. Dazu sind in Abbildung 5-58 die Luft- und Betontemperaturen für (*KW I*) und (*Wi I*) dargestellt. Wie zu erwarten, schwankte dabei die die Umgebungstemperatur zwischen 10 °C bis 30 °C über den gesamten Einbauzeitraum mehr als die Betontemperatur, die zwischen 20 °C bis 32 °C gemessen wurde. Da die Betontemperatur für die Qualität des Betons relevanter ist als die Umgebungstemperatur, ist dieser Vergleich in den Abbildungen 5-59 bis Abbildung 5-60 nochmals für alle Baustellen im Vergleich dargestellt. Für (*Wi I*) und (*Wi II*) wird jeweils nur der OB betrachtet, da die Temperaturverteilung in beiden Betonsorten ähnlich verlief.

Es zeigt sich dabei, dass sich die Betontemperatur analog zur Außentemperatur entwickelt, jedoch die Variation deutlich geringer ist. In *(KW I)* lag dabei die Betontemperatur im Mittel bei 27 °C, in *(KW II)* deutlich geringer bei knapp 23 °C. Analog dazu zeigt sich, dass in *(Wi I)* die mittlere Betontemperatur mit knapp 29 °C deutlich höher lag als in *(Wi II)* mit ca. 23 °C. Diese Temperaturunterschiede sind ein Ergebnis der höheren Außentemperaturen in *(KW I)* und *(Wi I)*.



Abbildung 5-58: Temperaturverteilung für Köln-Wahn und Wittlich



Abbildung 5-59: Betontemperatur für KW I (links) und KW II (rechts)



Abbildung 5-60: Betontemperatur für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB

Bau-	Beton-	T mean	T std	T std	T min	T max
stelle	sorte	[°C]	[K]	[%]	[°C]	[°C]
KW I	C1	26.9	1.7	6.2	17.5	30.7
KW II	C1	22.7	2.6	11.6	8.7	27.4
Wi I	OB	28.8	1.9	6.5	21.9	35.1
Wi II	OB	23.2	2.1	9.0	8.7	28.5
Wi I	UB	28.4	2.4	8.5	14.2	36.2
Wi II	UB	22.8	2.0	8.7	9.8	27.4

Tabelle 5.7: Übersicht über Betontemperaturen

5.1.2.10.5 Tagesverlauf

Neben der Gesamtstatistik können ebenso die Verteilung und Änderung der Größen über einen Einbautag analysiert werden. Damit lassen sich eventuelle Einflüsse des Temperaturverlaufs feststellen. Exemplarische Tage mit starken Temperaturschwankungen sind dabei in Abbildung 5-61 für *(KW I)* und Abbildung 5-62 für *(Wi I)* dargestellt. In beiden Fällen zeigt sich, dass die Mischzeit im Mittel relativ konstant bleibt. Jedoch gibt es im gesamten Tagesverlauf immer wieder Chargen, die eine zumeist höhere Mischzeit aufweisen. Es ist jedoch aus den Daten keine Korrelation mit der Tageszeit oder Temperatur ersichtlich. Die Endleistung schwankt stärker als die Mischzeit, liegt im Falle der Baustelle Köln-Wahn jedoch im Mittel einigermaßen konstant. Starke Schwankungen sind im Falle des OB auf der Baustelle Wittlich zu beobachten. Auch hier ist jedoch keine eindeutige Korrelation mit der Mischzeit, dem w/z-Wert oder der Temperatur erkennbar. Der w/z-Wert zeigt ebenso nur geringe Abweichungen auf. In Abbildung 5-61 ist zusätzlich noch die Verteilung der Gesamtwassermenge und des nachdosierten Wassers dargestellt. Diese korrelieren zum w/z-Wert, da dieser rechnerisch aus den Einwaagegrößen bestimmt wird. Es ist jedoch auch hieraus nicht ersichtlich, wann nachdosiert werden muss. Nachdosierungen treten scheinbar zufällig auf.



Abbildung 5-61: Exemplarischer Tagesverlauf von Mischzeit, Endleistung, w/z-Wert, Temperatur, Gesamtwasser und Nachdosierwassermenge in Köln-Wahn



Abbildung 5-62: Exemplarischer Tagesverlauf von Mischzeit, Endleistung, w/z-Wert und Temperatur für a) OB und b) UB in Wittlich

Zusammenfassend lässt sich, auch aus Gesprächen und Erfahrungen der auf der Baustelle tätigen Personen, feststellen, dass vor allem der Feuchte der Gesteinskornfraktionen eine entscheidende Rolle für den Prozessverlauf und die Gleichförmigkeit des Betongemisches zukommt. Zudem beeinflusst die Waage- und vor allem auch die Dosiergenauigkeit der Bunker die Qualität der Mischung. Als erste Schlussfolgerung sollte neben der Leistung auch die Feuchte der Gesteinskornfraktionen vor Zugabe aber insbesondere auch während des Mischvorgangs überwacht werden. Nähere Informationen und Erkenntnisse zu einer rheologischen Mischprozessführung werden dabei in AP B1 beschrieben.

5.1.2.11 Feuchtemesssonden

5.1.2.11.1 Stand auf der Baustelle

Bei der Analyse der mobilen Mischanlagen wurde als das größte Defizit die mangelhafte oder fehlende Kalibrierung der kapazitiven Feuchtemesssonden ersichtlich. Auf einigen besuchten Baustellen konnte sogar eine komplett deaktivierte Feuchtmesstechnik vorgefunden werden (vgl. Abbildung 5-63). Als Gründe für diese Maßnahme wurde, unabhängig von den ausführenden Bauunternehmen, im Konsens aller Befragten zum einem die aufwendige und schwierige Kalibrierung, und zum anderen die mehrmals in Frage gestellte Genauigkeit der Messergebnisse benannt. Die Baustellenanalysen verdeutlichten zudem, dass die Handlungen und Entscheidungen der Misch- und Einbaumeister einen enormen Einfluss auf die Güte des Betons haben. So zeigte sich, dass diese, unabhängig des Einsatzes von aktivierten oder deaktivierten Feuchtemesssonden oder sonstiger Messparameter, eine Bewertung der Konsistenz rein nach dem akustischen Verhalten des Betons im Mischer während des Mischprozesses vornehmen. Ein ähnlicher Vorgang konnte ebenfalls am Fertiger beim Einbaumeister verzeichnet werden. Dieser stütz seine Entscheidung zwar lediglich auf eine visuelle Beurteilung der Frischbetonkonsistenz. Doch wurde deutlich, dass deren teils äußerst subjektiven Einschätzung der gerade im Mischer produzierten Betoncharge (akustische Bewertung) oder abhängig der Rückmeldung des Einbaumeisters (visuelle Beurteilung) vom Mischmeister eine auf dessen Erfahrungswerten beruhende Anpassung des Wassergehalts vorgenommen wird. Zu berücksichtigen ist ferner, dass die visuelle Bewertung des Einbaumeisters erst zu längeren Rückmeldezeiten führt. Schließlich sind beim Einbau mehrere Transportfahrzeuge Verzug zum aktuellen Geschehen an der Mischanlage zu verzeichnen. Der Mischmeister kann folglich auf Rückmeldungen zur Einbausituation nur sehr spät reagieren, da zwischenzeitlich bereits mehrere Chargen eines möglicherweise qualitativ minderwertigen Beton produziert und zum Einbauort gefördert wurden, die vom Fertiger noch zu verbauen sind.



Abbildung 5-63: Deaktivierte Feuchtemesssensorik

5.1.2.11.2 Feuchtemessung

Wie zuvor erwähnt, wurde die Feuchte der feinen Gesteinskörnung (Sand) auf den meisten Baustellen nicht automatisiert erfasst, sondern vom Mischmeister nach aktueller Situation und Erfahrung eingestellt. Dies äußert sich z.B. wie in Abbildung 5-64 für *(KW I)* und *(KW II)* gezeigt, in dem gehäuften Auftauchen von einzelnen Feuchtewerten.



Abbildung 5-64: Feuchteeinstellung in KW I (links) und KW II (rechts)

In Ergänzung zu der erwähnten Baupraxis wurde auf der Baustelle Wittlich II dementsprechend die Feuchtemesssensorik korrekt kalibriert und während des zweiten Teils der Baustelle aktiv verwendet. Dazu wurde die Mischanlage ab dem 16.10.2019 für 9 Tage (von insgesamt 34 Baustellentagen) größtenteils im Feuchteautomatikbetrieb betrieben. Dazu sind in Abbildung 5-65 die Feuchtemessungen über den gesamten Zeitraum von *(Wi II)* (links) denen im reinen Automatikbetrieb (rechts) gegenübergestellt. Dabei zeigt sich deutlich, dass die automatisierte Feuchtemessung zu einer deutlich gleichmäßigeren Verteilung der Gestenskornfeuchte führt.



Abbildung 5-65: Feuchteeinstellung über gesamten Zeitraum in Wi II (links) und an Tagen mit Automatikbetrieb (rechts). OB (oben), UB (unten)

In einem nächsten Schritt kann verglichen werden, ob die Feuchteautomatik z.B. zu einer geringeren Wassernachdosierung geführt hat. Dazu ist die Wassernachdosierung in Abbildung 5-66 über den gesamten Zeitraum (links) der Wasserdosierung der Tage mit vorwiegend Automatikbetrieb (rechts) gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass sich beim OB (oben) auf den ersten Blick nur eine geringe Reduktion der Wassernachdosierungshäufigkeit und -menge ergibt. Für den UB (unten) hingegen lässt sich feststellen, dass deutlich weniger Wasser nachdosiert wurde. Während über den gesamten Zeitraum in 12 % der Chargen Wasser nachdosiert wurde, sind dies im Zeitraum des Automatikbetriebs nur noch 6 %. Dies kann neben der Verwendung der Feuchteautomatik natürlich noch weitere Gründe wie z.B. gleichmäßigere Wetterverhältnisse haben. Doch zeigt die Kombination mit der gleichmäßig verteilten Feuchtemessung, dass die Verwendung einer Feuchteautomatik zuverlässigere Werte liefert. Eine mögliche Erklärung für die weniger deutlichen Effekte beim OB als beim UB könnte die höhere Anforderung an die Konsistenz sein, wodurch der Mischmeister mehr aktiv eingreift und durch zusätzliche, teilweise subjektive, Kenngrößen wie des zeitlichen Verlaufs der Leistungskennlinie und des Geräuschs des Mischers nachdosiert.



Abbildung 5-66: Wassernachdosierung über gesamten Zeitraum in Wi II (links) und an Tagen mit Automatikbetrieb (rechts) für den OB (oben) und UB (unten)

5.1.2.12 Standort der Mischanlage und Logistik

Wie bereits erwähnt, ist unter anderem eine kontinuierliche und gleichmäßige Beschickung des Gleitschalungsfertigers mit Frischbeton maßgeblich für die Qualität der fertigen Betondecke. Um dies zu erzielen, müssen an der Mischanlage selbst, aber auch rund um diese, eine Vielzahl von Randbedingen erfüllt bzw. beachtet werden.

Bevor im Weiteren auf die einzelnen Teilaspekte eingegangen wird, ist zu erwähnen, dass auf den geographischen Standort der Mischanlage ein besonderes Augenmerk zu legen ist.

Es hat sich bei vergangen Baumaßnahmen gezeigt, dass sich kurze Transportwege positiv auf den Gesamtablauf einer Maßnahme auswirken. Auf evtl. Stillstände der Mischanlage oder des Fertigers kann schnell reagiert werden und die hieraus resultierenden Einflüsse können stark komprimiert werden.

Randbedingungen des Misch- und Lagerplatzes:

- 1) Größe und Beschaffenheit des Mischplatzes
- 2) Lagerung Zement
- 3) Lagerung Zuschlagsstoffe
- 4) Wasserbevorratung
- 5) Zufahrts- und Transportwege
- 6) Art der Transportfahrzeuge



Abbildung 5-67: Übersicht Misch- und Lagerplatz

1) Größe und Beschaffenheit des Mischplatzes:

Bei den im Verbundvorhaben untersuchten Baustellen hat sich gezeigt, dass beim Einsatz von zwei Mischanlagen, z.B. für den Typ Mobilmix 2.5, ein Platzbedarf von min. 10.000 m² erforderlich ist. Dieser Platz dient als Standortort für die Aufstellung der Mischanalgen sowie zur Lagerung der Zemente und der Gesteinskörnung.

Grundsätzlich muss die Aufstellfläche für die Mischanlage eine ausreichende und dauerhafte Tragfähigkeit besitzen. Darüber hinaus ist eine hohe Ebenheit der Aufstellfläche von ± 1 cm anzustreben. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Mischanlage schnell und sicher auf- und abgebaut werden kann. Des Weiteren wird vermieden, dass sich durch z.B. evtl. nachträgliche Setzung der Aufstellfläche Schäden an der Mischanlage einstellen. Schäden an der Mischanlage führen zwangsläufig zu Produktionsausfällen oder gar zum Stillstand.

2) Lagerung Zement:

Der für die Baumaßnahme benötigte Zement wird in Silos unmittelbar neben der Mischanlage bevorratet. Als Bestandteil der Mischanlage gelten hierbei die gleichen Anforderungen an die Aufstellfläche wie bei der Mischanlage selbst.

Die Anordnung eines Stellplatzes für Silofahrzeuge, welche den Zement anliefern, muss hierbei vorgesehen werden. Dieser muss unmittelbar neben den Silos angeordnet sein, um das Umfüllen des Zementes vom Silofahrzeug in eines der Silos der Mischanlage zu gewährleisten. Es empfiehlt sich, diesen Platz als gesonderte Fläche neben den Fahrspuren anzuordnen, somit lassen sich etwaige Beeinflussung des restlichen Transportverkehrs vermeiden.

Darüber hinaus ist der Situation Rechnung zu tragen, dass ggf. mehrere Silofahrzeuge zeitgleich die Mischanlage anfahren. Diese Situation kann infolge von Verkehrsbeeinträchtigungen des Anlieferweges auftreten, darf jedoch nicht zu einem Stillstand der Mischanlage führen.

3) Lagerung Zuschlagsstoffe:

Um einen kontinuierlichen und schnellen Mischbetrieb zu ermöglichen, müssen die benötigten Gesteinskornfraktionen möglichst nah an den Doseuren lagern. Hierdurch ist eine schnelle Befüllung dieser möglich und Unterbrechungen des Mischvorgangs werden vermieden. Im Speziellen ist darauf zu achten, dass die Lagerflächen ausreichend und dauerhafte Tragfähigkeit sind. Das Weitern hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass auf eine ausreichende Entwässerung der Lagerfläche vorteilhaft ist. Wasser, welches ggf. bereits seitens des Lieferwerkes an den Gesteinskörnungen haftet oder durch Regenereignisse sowie eine evtl. Bewässerung den Gesteinskörnern zugeführt wird, muss sicher und schnell abgeführt werden können. Somit kann eine überproportionale Ansammlung von Wasser in den unteren Schichten des Haufwerkes vermieden werden und ein möglichst homogener Feuchtegehalt der Zuschlagsstoffe erreicht werden.

Gleichfalls wird vermieden, dass Wasser auf der Lagerfläche stehen bleibt und diese aufweicht. Durch die Befahrung mittels Radlader könnte dies zu einer Vermischung des Materials der Unterlage mit den Zuschlagstoffen führen. Hierdurch werden Fremdstoffe in den Beton eingebracht, welche die Betonqualität negativ beeinflussen.



Abbildung 5-68: Asphaltierte Lagerfläche für feine Gesteinskörnungen mit ausreichender Entwässerungsmöglichkeit

4) Wasserbevorratung:

Gem. DIN 1045 darf für die Herstellung von Beton ausschließlich Frischwasser verwendet werden. Ausgehend von einem max. w/z-Wert von 0,45 und einem min. Zementgehalt von 340 kg/m³ ergibt sich ein Wasserbedarf von rd. 150 l/m³. Unter der Annahme, dass je Stunde 200 m³ Beton produziert werden, ergibt sich ein rechnerischer Wasserbedarf von 30.000 l (30 m³) pro Stunde. Diese Menge kann i.d.R. nicht aus dem öffentlichen Wassernetz entnommen werden.

Somit ist es erforderlich, dass auf dem Mischplatz eine entsprechende Wasserbevorratung erfolgt, um einen kontinuierlichen Mischprozess sicherzustellen. Dies kann durch die Anordnung von großvolumigen Tanks erfolgen.

5) Zufahrts- und Transportwege:

Auf Grund des hohen Massenbedarfs an Beton für die Herstellung von Fahrbahndecken werden arbeitstäglich große Mengen an Gesteinskörnungen sowie Zement benötigt. Eine Bevorratung der gesamten Tagesmengen auf dem Mischplatz ist nicht immer möglich, somit müssen ggf. während des laufenden Mischbetriebs frische Gesteinskörnungen und Zement angeliefert werden. Dies stellt an die Logistik der gesamten Mischanlage bzw. des Mischplatzes große Anforderungen. Des Weiteren muss gewährleistet sein, dass alle Fahrwege eine ausreichende Kapazität für die an- und abfahrenden Transportfahrzeuge aufweisen.

Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass hierdurch die Frischbetontransporte zw. Mischanlage und Baustelle nicht beeinträchtigt werden. Ausgehend von einer stündlichen Mischleistung von 200 m³ und einem Transport mittels Sattelfahrzeugen mit einem Ladevolumen von 10 m³ ergeben sich pro Tag bis zu 200 Fahrten zwischen Mischanlage und Fertiger.

Eine ausreichende und dauerhafte Tragfähigkeit der Fahrwege muss zu jedem Zeitpunkt gegeben sein, um die Stoffströme in alle v.g. Richtungen zu gewährleisten.

Auch auf einen entsprechenden Abfluss des Oberflächenwassers ist hierbei Augenmerk zu legen. Bei unzureichender oder falsch angelegter Entwässerung können Fremdstoffe in die Zuschläge geschwemmt werden und diese verunreinigen. Des Weiteren können Fahrwege unter der starken Belastung des Transportverkehrs versagen.

6) Art der Transportfahrzeuge

Grundsätzlich gilt bei den Transportfahrzeugen sowohl für die Zuschläge als auch für den Frischbeton, dass keine Fahrzeuge mit Aluminiummulde verwendet werden dürfen. Grund hierfür ist, dass sich durch die Zuschlagsstoffe feine Bestandteile des Aluminiums ablösen. Dieser Effekt wird bei dem Einsatz von gebrochenen Gesteinskörnungen noch verstärkt und führt zu einer möglichen Reaktion des Aluminiums mit dem Zement.

Im Einzelnen reagiert das Aluminium in pulvriger Form mit den alkalischen Bestandteilen des Zementes, wodurch Wasserstoff entsteht.

Bei in Aluminiummulden transportiertem <u>Fahrbahndeckenbeton</u> kann der bei der Reaktion von Aluminiumteilchen mit <u>Calciumhydroxid</u> entstehende Wasserstoff einen Gasdruck ausüben, der im Feinmörtel zur Oberfläche strebt und einen Aufstiegskanal im weichen <u>Frischbeton</u> hinterlassen. An der Oberfläche bildet der Wasserstoff dann eine Blase im <u>Zementleim</u>. Fällt die Blase zusammen, lagert sich Zementleim um die kraterförmige Öffnung ringförmig ab. Nach dem Erhärten des Betons bleibt dieser Ring als kreisförmige Erhebung aus <u>Calciumcarbonat</u> deutlich sichtbar an der Oberfläche zurück [Fiala 1999].

Der Transport des Frischbetons kann in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten der Baumaßnahme mit Drei-, Vier-Achsenkipper, Sattel oder Dumper erfolgen.

Ein Augenmerk ist hierbei, insbesondre beim Transport des Oberbetons, auf die Form der Mulde zu legen. Die am Markt häufigsten Muldenformen sind halbrunde und eckige Mulden.

Wie bereits beschrieben, wird der Oberbeton i.d.R. mittels eines Mobilbaggers vom LKW auf das Förderband am Gleitschalungsfertiger übergeben. Somit erfolgt die Entladung des LKW mit dem Baggerlöffel. Um eine schnelle und möglichst hundertprozentige Entladung zu ermöglichen, ist der Einsatz von eckigen den halbrunden Mulden vorzuziehen. Bei allem Baumaßnahmen hat sich eine eindeutige Kennzeichnung der Fahrzeuge bewährt. Hierbei wird jedes Fahrzeug mit einer Nummer sowie einer Kennzeichnung über die Art des Betons (Ober- oder Unterbeton) versehen (vgl. Abbildung 5-69). Somit können Verwechselungen bei der Be- und Entladung ausgeschlossen werden. Des Weiteren wir unter anderem die interne Baustellenkommunikation hierdurch deutlich verbessert.



Abbildung 5-69: Exemplarisch Sattel mit eckiger Mulde und Kennzeichnung

5.1.3 A1.3 - Analyse der Übergabe des Frischbetons an den Muldenkipper und der Fahrt zum Einbauort auf der Baustelle und Übergabe an den Fertiger

Im Rahmen der Ist-Zustandsanalyse ist der Transport der Betone vom Mischwerk zum Einbauort mit Muldenkipper (Regelfall) oder Fahrmischer zu analysieren. Die Entladung des Unterbetons erfolgt zumeist durch eine Kippentladung vor dem Fertiger der Unterbetonlage und eine manuelle Querverteilung mittels Verteilerschwert. Der Oberbeton hingegen wird zumeist mit der Baggerschaufel entladen und anschließend durch die Entleerung der Schaufel auf ein Förderband gegeben, das den Fahrbahnbeton über den ersten Fertiger (Einbau Unterbeton) hinweg unmittelbar vor den zweiten Fertiger (Einbau Oberbeton) führt. Die Unter- und Oberbetone werden auf die gegebenen Frischbetoneigenschaften hin untersucht. Eine zentrale Rolle sollte dabei dem mobilen Einsatz eines Gyrators zukommen, da dieser erlaubt, die rheologischen Eigenschaften des Unter- bzw. Oberbetons unter realitätsnahen Verdichtungsbedingungen zu ermitteln. Bei den im Labor des IWB durchgeführten Voruntersuchungen wurde versucht, den für den Laboreinsatz entwickelten Gyrator für den Baustelleneinsatz vorzubereiten, um diesen zur Rezepturanalyse zum Einsatz zu bringen. Allerdings erwies sich dieses Ansinnen nicht für praktikabel, weshalb die Gyratoranalysen bei der Bearbeitung des Verbundvorhabens im Wesentlichen auf den Einsatz im Mischtechnikum an den Frischbetonen, die mit der realmaßstäblichen Mischanlage, vorgenommen wurden.

Auf der Baustelle wurden an repräsentativen Betonproben zum Vergleich Darrversuche und Messungen mit der Feuchtemesssonde von Imko vorgenommen. Als wesentliche Kenngröße für die Charakterisierung der Frischbetoneigenschaften nach dem Mischende und zur Feststellung der Eignung für den Einbau mit dem Fertiger ist die Grünstandfestigkeit zu charakterisieren. Durch die Baustellenbegehungen konnten Unterschiede in den Prozessabläufen und Rahmenbedingungen in der Logistikkette identifiziert werden. Bei den Maßnahmen auf der A1 Hamburg, A1 Wittlich und in Köln-Wahn wurde ein mobiles Mischwerk zur Herstellung des Ober- und Unterbetons eingesetzt und in einem festen Rhythmus die beiden verschiedenen Betonsorten hergestellt. Im Falle der Baustelle Köln-Wahn wurde nur einlagig eingebaut und damit auch nur eine Betonsorte gefertigt. Bei den genannten Baustellen war immer ein gleicher Transportweg gegeben und es konnte eine feste Synchronisation der unterschiedlichen Material-chargen sichergestellt werden. Bei der Baustelle auf der A61 in Dieblich wurden die Frischbetone hingegen von zwei verschiedenen Transportbetonwerken bezogen und mit unterschiedlichen Transportfahrzeugen geliefert. Zum Transport des Unterbetons kamen Muldenkipper zum Einsatz. Der Oberbeton wurde mit Fahrmischern transportiert. Dies stellt besondere Herausforderungen an die Synchronisation der zwei unterschiedlichen Eetonwerke sowie an die jeweilig anhängenden Logistikketten.

Für das Verbundvorhaben von großem Interesse war der Einsatz des Planungs- und Überwachungstools BPO der Firma Volz Consulting GmbH, mit diesem lassen sich die zeitlichen Abläufe des Mischens, Transportierens und Einbauens dokumentieren. Üblicherweise geschieht dies durch die manuelle Eingabe der Ankunfts-, Be-/Entlade- und Abfahrtszeiten der Muldenkipper bzw. Fahrmischer am Mischwerk bzw. Fertiger durch das Personal. Somit werden zusätzliche Personalkosten verursacht. Aber trotz der Dokumentation und der frühen Erkennung von Synchronisationsproblemen konnten bei der Baustellenbegehung Materialengpässe beobachtet werden. Zum Zeitpunkt der Bauwerksanalysen konnten diese Synchronisationsprobleme auf das an der Auslastungsgrenze betriebene Transportbetonwerk für den Unterbeton zurückgeführt werden. Ähnliche Taktungsprobleme waren auch bei den Maßnahmen A1 Hamburg und A1 Wittlich beobachtet worden.

Auch bei der Baustelle A1 Hamburg kam das BPO Tool zum Einsatz. Dank des Tools konnte das Problem zwar schnell identifiziert, jedoch nicht verhindert werden. Als mögliche Ursache für die Synchronisationsprobleme auf der Baustelle A1 Hamburg wurde die Betonherstellung identifiziert, da hier mit einer mobilen Mischanlage die zyklische Herstellung der beiden Betonsorten für den Unter- und Oberbeton realisiert werden mußte.

Die zuvor genannten Beobachtungen werden im Folgenden exemplarisch mithilfe des Überwachungstools BPO an der Baustelle Dieblich I *(Di I)* dargestellt. Dazu wurden die Ankunfts- und Abfahrtzeiten der LKWs an den Mischwerken sowie am Fertiger durch die Fa. Schnorpfeil überwacht. Daraus können zunächst einmal charakteristische Kenngrößen gewonnen werden. So kann die Ist-Produktion der Mischanlagen mit den im Voraus geplanten Liefermengen und -zeiten abgeglichen und ggf. angepasst werden. Dies ist auch in Abbildung 5-70 dargestellt, in der, nach einem Verzug durch eine Störung am Fertiger, die geplante Sollproduktion neu angepasst wurde.



Abbildung 5-70: Exemplarisches Einbaudiagramm auf der Baustelle Dieblich I

Daneben bietet eine Aufzeichnung der Transportkette ebenso die Möglichkeiten zur Analyse der Rundenzeiten und damit die Identifikation von Engpässen. Anhand von Abbildung 5-71 ist z.B. ersichtlich, dass die LKW in diesem Falle deutlich länger für die Rückfahrt benötigt haben, als geplant.





Besonders interessant für eine Auswertung ist ebenso die Erfassung von Nachrichten und Gründen für einen Produktionsstopp oder anderweitige Änderungen. In Tabelle 5.8 sind dazu verschiedene tatsächlich aufgezeichnete Nachrichten dargestellt. Die ersten drei Nachrichten zeigen den Ablauf eines Produktionsstopps aufgrund einer Störung an einem der Fertiger. Dadurch kann zeitnah auf das Problem reagiert werden, ohne dass jede Person einzeln verständigt werden muss. Zudem ist damit eindeutig dokumentiert, was wann passiert ist, um eine spätere Analyse und Verbesserungen durchzuführen. Analog zu Problemen am Fertiger kann ebenso eine Störung an der Mischanlage oder einem Transportfahrzeug auftreten, wie im zweiten und dritten Beispiel gezeigt. Weiterhin können Änderungen in der Transportkette, hier z.B. durch Hinzufügen eines weiteren LKW, erfasst werden. Idealerweise können diese Daten dann automatisch erfasst und weiterverarbeitet werden, sodass eine flexible Anpassung und Vorausplanung möglich ist. Da die Abstimmung der einzelnen Baustellenteilnehmer sowohl für die Planung als auch für eine Qualitätsüberwachung eine zentrale Rolle spielt, wird im Zuge dieses Projektes ebenso an einer verbesserten digitalen Vernetzung gearbeitet. Für nähere Informationen sei an dieser Stelle auf die Vorstellung der Arbeiten in AP C3 verwiesen.

Datum, Uhrzeit	Nachricht
XX.09.2017, 09:23	Unterbeton pausieren. Förderband Oberbetonfertiger defekt.
XX.09.2017, 09:31	Letztes Auto [XYZ]. Danach Pause!
XX.09.2017, 09:45	Oberbetonfertiger läuft wieder
XY.09.2017, 08:44	Unterbeton wird 20 Minuten gestoppt wegen Reparaturarbeiten an der Misch- anlage. Oberbeton bitte weiterfahren.
XY.09.2017, 09:01	Reparaturarbeiten sind beendet. Unterbeton wird weiter gefahren.
YY.10.2017, 07:29	Lkw fährt nicht wegen plattem Reifen
YX.09.2017, 10:08	[Werk 1] stellt einen 5. LKW.

Tabelle 5.8: Exemplarisch mit dem BPO Tool erfasste Problembeschreibungen auf der Baustelle Dieblich I

Auf der Baustelle Köln-Wahn kam eine mobile Mischanlage zum Einsatz. Da in diesem Fall nur einlagig eingebaut wurde. sowie die Mischanlage in unmittelbarer Nähe zum Einbauort aufgebaut werden konnte, wurde keine Aufzeichnung der Transportzeiten mittels BPO durchgeführt. Jedoch wurden an einem Tag exemplarisch die Abfahrts- und Befüllzeiten an der Mischanlage von Hand aufgezeichnet. Die LKW wurden jeweils mit 4 Chargen beladen. Dabei wurden jeweils 2 Chargen gleichzeitig durch die beiden vorhandenen Mischer der mobilen Mischanlage gefertigt. Insgesamt ergab sich dadurch eine durchschnittliche Befüllzeit von 3 min. Ein LKW benötigte im Schnitt 21 min, bis er wieder an die Mischanlage zurückkam. Daraus ergibt sich ein Durchsatz von 14 LKW pro Stunde. Eine genauere Auswertung der Durchlaufzeiten sowie die Analyse der aufgetretenen Probleme konnte jedoch nicht durchgeführt werden. Doch wurde, wie im Kapitel 5.1.7 beschrieben, eine Rückrechnung auf die Transportzeit durch die aufgezeichneten Daten an der Mischanlage und am Fertiger vorgenommen. Diese Rückrechnung liefert allerdings keine Informationen über Stand- und Wartezeiten der LKW vor der Mischanlage und dem Fertiger.

Dementsprechend musste im Zuge der digitalen Vernetzung eine erweiterte Funktionalität aufgebaut werden. Zur Überwachung aller Logistikteilnehmer war daher eine GPS-basierte Lösung ebenso gesucht, wie die automatische Quittierung der Übergabe der Betonmischungen an die LKWs. Mit der Verfügbarkeit einer modellbasierten Überwachung der Logistikkette wäre daher ein großes Potential gegeben, da mit statistischen Aussagen zur voraussichtlichen Fahrzeit sowie zu den weiteren Prozesszeiten der einzelnen Prozessschritte eine höhere Prozesssicherheit geschaffen werden kann. Ein Grundkonzept zur schematischen Darstellung eines solchen Modells wird in Kapitel 7.1.1.1 exemplarisch anhand der Logistikkette vorgestellt.

Um die Auswirkungen der Transportkette auf die Qualität der Betonfahrbahn zu analysieren, wurde ein Vergleich der Konsistenz, des Luftporengehalts und der Frischbetonrohdichte an der Mischanlage mit den nach dem Transport zum Einbauort am Gleitschalungsfertiger noch gegebenen Eigenschaften hinsichtlich Konsistenz, Luftporengehalt und Frischbetonrohdichte vorgenommen.

Bezüglich des Luftporengehalts war ursprünglich vorgesehen, neben der Bestimmung des LP-Gehalts mit dem Druckausgleichverfahren nach DIN EN 12350-7 auch die Analyse des Mikroluftporengehalts mit dem Air-Void-Analyzer (AVA) zu bestimmen. Das wie der Gyrator eigentlich für den Laboreinsatz entwickelte Gerät erwies sich im Rahmen des ersten Baustelleneinsatzes gleichermaßen nicht für den Feldeinsatz geeignet. Folglich mussten sich die Baustellenanalysen auf die Bestimmung des LP-Gehalts (Luftporentopf), die Frischbetonkonsistenz (Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß), die Frischbetonrohdichte und die Frischbetontemperatur beschränken.

In Summe wurden die folgenden Prozesse und Maßnahmen zur Steigerung der Qualität der Fahrbahnherstellung systematisch analysiert:

- Übergabe des Unter- und Oberbetons an den Fertiger
- Aufbau einer Kommunikation zwischen Straßenfertiger und Fahrzeug
- Ampelsteuerung für den Fahrer
- Entleerung über Füllstandsteuerung
- Kameraüberwachung
- Daten-Kommunikation der Prozessteilnehmer

Im weiteren Projektverlauf gilt es diese Maßnahmen und Prozesse detailliert zu untersuchen und deren Potential für die Steigerung der Qualität von Betonfahrbahnen zu evaluieren.

Beim Transport des Frischbetons sind vor allem auf den frei gewählten Baustellen die langen Wartezeiten der LKWs bei teilweise sehr kurzen Transportwegen aufgefallen, wohingegen die gemeinsam besuchten Baumaßnahmen (Flughafen Köln-Wahn & A1 Wittlich-Salmtal) einen stetigen Materialfluss und Einbau aufgewiesen haben. Im Speziellen konnten bei einer Baustelle nicht nur ein Transportweg von mehreren Kilometern, sondern stellenweise auch Wartezeiten von bis zu 45 Minuten zwischen der Entladung des Frischbetons aus dem LKW und dessen Einbau verzeichnet werden. Die hierzu untersuchten Betonchargen wiesen in ihren Frischbetonkennwerten infolge der sommerlichen Umgebungsbedingungen inklusive direkter Sonneneinstrahlung eine deutlich negative Veränderung auf. Diese Betonchargen hätten entsprechend der Aussage des dortigen Baustoffprüfers aufgrund von groben Qualitätsmängel nicht eingebaut werden dürfen, obgleich diese verarbeitet wurden.

5.1.4 A1.4 - Einbau und Verdichten der Betonlagen mittels Fertiger, Glättung der Oberfläche und Nachbehandlung

Der Fertigungsprozess der Betonlagen konnte auf den verschiedenen Maßnahmen näher untersucht werden. Hierbei stehen die Erkenntnisse der Baumaßnahme A61 Dieblich (Di I) und (Di II) im Fokus, da bei dieser Baustelle der Fertiger mit erweiterter Sensorik ausgestattet wurde. In den folgenden Kapiteln Allgemeine Beobachtungen und Rahmenbedingungen, Dokumentation und Analyse einer Tagleistung der Maßnahme A61 Dieblich und Laboruntersuchungen zum Verdichtungsverhalten werden die durchgeführten Arbeiten aufgeführt.

5.1.4.1 Allgemeine Beobachtungen und Rahmenbedingungen

Bei den im Berichtszeitraum besuchten Baustellen wurden bei allen Maßnahmen Gleitschalungsfertiger der Firma Wirtgen eingesetzt. Die Beschickung des Unterbetonfertigers erfolgt üblicherweise durch ein Abladen des Unterbetons vor dem Fertiger und eine Vorverteilung durch einen Bagger. Der Oberbetonfertiger wird üblicherweise durch einen Bagger und ein Transportband über den Unterbetonfertiger beschickt. Dieses Vorgehen wurde so bei den Maßnahmen A1 Hamburg und A1 Wittlich beobachtet. Die Ausnahme stellt die Maßnahme A61 Dieblich (Di II) dar. Durch den konstruktiven Aufbau der Fahrbahn als Horizontalhybrid der Bauweisen Asphalt und Beton wurde hier der Oberbetonfertiger von der Seite mittels Fahrmischern und einem Transportband beschickt. Dieses Vorgehen spart einen Bagger zum Beschicken des Oberbetonfertigers ein und entkoppelt diesen vom Unterbetonfertiger. Somit entspannen sich die harten Synchronisationsanforderungen
zwischen Ober- und Unterbeton an die Logistikkette und Mischwerk. Weiter wurden auf der A61 Dieblich die Dübel nicht wie üblicherweise in den Beton eingerüttelt, sondern im Vorfeld mittels Körben durch das Personal gesetzt.

Beim Einbauprozess auf der A1 Hamburg konnten während der Begehung neben dem Anhalten des Fertigers aufgrund von Materialmangel keine weiteren Auffälligkeiten beobachtet werden. Auf der A61 bei Dieblich wurden beim Einbau der Unterbetonlage gegen die Asphaltschicht stellenweise Fehlstellen in der Unterbetonoberfläche produziert. Diese werden jedoch durch den Oberbetoneinbau wieder vollständig ausgeglichen, da die Ebenheitsvermessung der fertigen Fahrbahn im Rahmen der Toleranzen zufriedenstellend verlaufen ist. Eine solche Fehlstelle ist exemplarisch in Abbildung 5-72 gezeigt.



Abbildung 5-72: Beispiel einer Fehlstelle in der Unterbetonoberfläche.

Auf der Baumaßnahme A1 Wittlich konnten neben einem Oberbetonmangel sichtbare Qualitätsschwankungen während des Einbauprozesses festgestellt werden. Hierbei ist der Unterbeton sichtbar sehr spröde und somit bilden sich beim Einbau *große* Lunker in der Unterbetonschicht. Die Abbildung 5-73 zeigt ein Beispiel einer sehr spröden Unterbetonqualität während des Einbauprozesses und das Profil der fertigen Fahrbahn.



Abbildung 5-73: Qualitätsschwankungen im Unterbeton während des Einbaus (links) und der fertigen Fahrbahn (rechts).

5.1.4.2 Dokumentation und Analyse verschiedener Baumaßnahmen

Die Firma Wirtgen hat sich im Rahmen der Erfassung der Daten zum einen mit Messreihen am Betonfertiger beschäftigt, aber auch mit dem Baustellenablauf und der -logistik sowie äußeren Einflüssen.

Es wurden die folgenden Bauvorhaben dokumentiert:

- 1. Bauvorhaben A61 Dieblich 1: Dokumentation und Messdatenlogging eines Baustellentages
- 2. Bauvorhaben Flughafen Köln/Bonn: Dokumentation von 5 Baustellentagen, Messdatenlogging an 18 Baustellentagen
- 3. Bauvorhaben A1 Wittlich: Dokumentation und Messdatenlogging an zwei Baustellentagen
- 4. Bauvorhaben A61 Dieblich 2: Dokumentation und Messdatenlogging eines Baustellentages
- 5. Bauvorhaben A1 Wittlich 2: Messdatenlogging an 30 Baustellentage
- 6. Bauvorhaben A1 Wittlich 3 (Demonstrator I): Ersteinsatz der Ebenheitserkennungs- und Telematiksystem an 14 Baustellentagen
- 7. Bauvorhaben A61 Boppard: Messdatenlogging und Einsatz des Telematiksystems am Demonstrationstag

Mittels Datenlogger wurden die Maschinenbewegungen, wie Höhenverstellungen und Neigungen, Vorschübe sowie zentimetergenaue Positionsdaten aufgezeichnet. Die Messfrequenzen der Maschinendaten betrugen 100 Hz, die der Position 4 Hz.

Während die erste Betonbaustelle auf der A61 bei Dieblich im Jahre 2017 (*Di I*) noch mit Gleitschalungsfertigern vom Typ SP500 durchgeführt wurde, wurde an das Bauunternehmen Schnorpfeil im Frühjahr 2018 zwei neue Wirtgen SP94i Fertiger ausgeliefert, mit denen alle in der Folge besuchten Baustellen durchgeführt wurden. Lediglich auf der zweiten Demonstrationsbaustelle 2021 musste aus zeitlichen Aspekten beim Oberbeton erneut auf die Maschine des Typs SP500 zurückgegriffen werden. Diese Neuerung der Betoneinbaugeräte war auch für die Messdatenerfassung überaus von Vorteil, da der SP94i im Gegensatz zum SP500 über einen Maschinen-CAN-Bus verfügt. Auf diesem Bus-System sind bereits viele Maschinenparameter hinterlegt und abrufbar.

Die Abbildung 5-74 zeigt, welche zusätzlichen Sensoren an beiden Fertigertypen an welchen Positionen des Fertigers angebracht wurden.





Am SP94i wurden zusätzlich Messdaten zur Betonverteilung (Position und Bewegungsrichtung Verteilerschwert), Verdichtung (Frequenz der Rüttler) und Nachbehandlung (Position, Bewegungsrichtung von Querund Längsglätter) aufgezeichnet. Des Weiteren wurde mit Hilfe einer Wetterstation Umweltdaten und mittels Thermometer die Temperatur des Frischbetons am Muldenausgang gemessen.

Für die Baustelle Wittlich II (*Wi II*) sollten für eine spätere Analyse möglichst alle aufgezeichneten Daten mit einem und demselben GPS-Koordinatensystem gemessen werden. Dies betrifft die Daten von drei Partnern:

- Die **Fa. Schnorpfeil** arbeitet mit zwei Leitdrähten, die die Referenz für den Gleitschalungsfertiger darstellen. Die Drähte werden an jedem Pin, an denen sie aufgehängt sind, global vermessen.
- Durch den Messdatenlogger der **Fa. Wirtgen** werden diverse Maschinenkennwerte geloggt, mit dessen Hilfe Standzeiten, Verdichtungsenergien, Höhen- und Lenkregelungen etc. analysiert werden können. Mittels GPS-Empfänger können diese Kennwerte global zurückverfolgt werden.
- Durch die nachträgliche Vermessung der Deckschicht durch die **Fa. Lehmann + Partner** können Unregelmäßigkeiten im Beton erkannt werden. Diese Daten liegen ebenfalls im globalen Koordinatensystem.

Da die GPS-Positionen aller drei Beteiligten in deren eigenem Koordinatensystem aufgezeichnet werden, die sich, absolut gesehen, mehrere Meter unterscheiden können, war es notwendig, Fixpunkte von allen Partnern zu vermessen, sodass die Koordinaten in der Folge überlagert werden können. Hierfür wurden durch Schnorpfeil sieben Referenzboxen (vgl. Abbildung 5-75) entlang der Baustelle installiert.



Abbildung 5-75: Referenzbox an einem Leitpfosten

Diese Boxen durften zum einen nicht den Baustellenablauf einschränken. Zum andern mussten sie so lange aufgestellt bleiben, bis auch die Ebenheitsmessfahrt durch Lehmann + Partner durchgeführt werden konnte.

Um mit einer größtmöglichen GPS-Genauigkeit arbeiten zu können, war es notwendig, eine GPS-Basisstation zu nutzen. Diese wird fix an einem Ort aufgestellt und versorgt den Mess-Empfänger mit Korrekturdaten. So lassen sich Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichen. Diese Korrekturdaten werden per Funk transferiert. Auf geraden Strecken kann hiermit eine Reichweite von ca. 4 bis 5 Kilometern erreicht werden. Aufgrund der großen Baustellenlänge von sieben Kilometern, dem kurvigen Straßenverlauf und einer dicht bewaldeten Umgebung musste die Basis bei der Baumaßnahme Wittlich II allerdings des Öfteren umziehen. Weiterhin wurde die Station (vgl. Abbildung 5-76) per Batterie mit Spannung versorgt, sodass diese autark arbeiten konnte. Dies waren Gründe dafür, an etwa zwei Tagen pro Woche die Baustelle zu besuchen. Abbildung 5-76 zeigt den Aufbau der Basisstation an einer Leitschutzbeplankung.



Abbildung 5-76: Aufbau der GPS-Basisstation

Im Rahmen der Betonbaustelle auf der Bundesautobahn 61 bei Dieblich wurde eine Tagesleistung dokumentiert und aufgezeichnet. Abbildung 5-77 zeigt eine Übersichtkarte der gesamten Baustelle (grün) sowie des aufgezeichneten Bereich (magenta).



Abbildung 5-77: Übersichtkarte der Betonbaustelle auf der A61 bei Dieblich.

An dieser Stelle werden einige Fakten aufgeführt:

- Tag der Dokumentation: 27. September 2017
- Aufgezeichnet wurde eine Tagesleistung mit der Länge von 358 Metern
- Die Baustellenarbeitszeit lag an diesem Tag bei 9:24 Stunden, wobei von dieser Zeit der Fertiger 5:23 Stunden arbeitete und 4:01 Stunden stillstand hatte
- Die mittlere Einbaugeschwindigkeit (ohne Standzeit) betrug 1,1 m/min
- Es kam zu 45 Stopps, die zumeist auf fehlendes Einbaumaterial zurückzuführen waren.

An welchen Positionen die Maschine stoppte, zeigt Abbildung 5-78.



Abbildung 5-78: Maschinenstopps im dokumentierten Baustellenabschnitt.

Des Weiteren wurde für die Baustellenlogistik das Eintreffen der den Frischbeton anliefernden Fahrzeuge sowie das Entladen des Betons dokumentiert. Ebenso wurden Besonderheiten wie Unregelmäßigkeiten im Unterbeton, manuelle Verstellung an der Betonausrüstung etc. beschrieben.

Die aufgezeichneten Daten konnten im Laufe des Projektes mit den Ebenheitsmessungen, die vom Projektpartner Lehmann+Partner nach dem Fertigstellen des Betoneinbaus vorgenommen wurden, konsolidiert werden. Der Firma Wirtgen wurden die Oberflächenmesswerte in einem Raster von 10 x 10 cm zur Verfügung gestellt. Da auf einer Breite von 1,80 m gemessen wurde, konnten so 19 Längslinien extrudiert werden. Die Ebenheitsbestimmung in allen 19 Längsspuren sowie die resultierende Ebenheit, gemittelt über die gesamte Breite, sind in der folgenden Abbildung 5-79 dargestellt.



Abbildung 5-79: Ebenheitssimulation der Einzelspuren sowie die resultierende Ebenheit.

Weiterhin wurden die Maschinenstopps in die Grafik der resultierenden Ebenheit geplottet, da das Anhalten des Fertigers dazu führen könnte, dass sich Unebenheiten bilden. Die nachfolgende Abbildung 5-80 zeigt dies:



Abbildung 5-80: Simulierte Ebenheit mit Maschinenstopps.

Da in der Abbildung 5-80 zunächst keine Regelmäßigkeiten zu erkennen sind, werden die Ebenheiten des Weiteren in einer 2D-Oberflächengrafik dargestellt (vgl. Abbildung 5-81).



Abbildung 5-81: Darstellung der Ebenheitssimulation auf einem 10 x 10 cm Raster.

Auch hier ist erkennbar, dass die Abweichungen sehr unregelmäßig auftreten. Die aufgezeichneten Oberflächenmesswerten und die Maschinendaten bestätigen bisher noch keine Korrelation zwischen Maschinenstopps und Unebenheiten.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Ebenheitsmessung der Firma Lehmann + Partner bei sehr schlechten Witterungsbedingungen durchgeführt wurde. Diese Messung wurde durch Blätter, Regen und Schnee stark verfälscht, was vermutlich zu einem Rauschen der Messsignale führt, das in Abbildung 5-79 bis Abbildung 5-81 zu erkennen ist. Weiter kam es durch Ausweichmanöver während des Messens zu Spurwechseln, die ebenfalls das Ergebnis beeinflussen.

Bei Abnahme der Baustelle wurde eine Planografenmessung durchgeführt, die ergab, dass die Baustelle zufriedenstellend in der Toleranz lag.

Da die Firma Lehmann + Partner die Ebenheiten der Deckschichten der Baustellen Dieblich I & II (*Di I*) und (*Di I*) sowie Wittlich I (*Wi I*) aufgezeichnet hat, konnten diese in der Folge analysiert werden. In Abbildung 5-82 ist die Häufigkeitsverteilung der Unebenheiten dargestellt. Dabei wurden die Ebenheitsmessungen aller aufgezeichneten Fahrspuren der genannten Baustellen untersucht.



Abbildung 5-82: Häufigkeitsverteilung der Unebenheiten der analysierten Baustellen

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, haben die meisten Unebenheiten eine Höhe zwischen 1-2 mm und liegen damit deutlich unter dem Schwellwert von 4 mm. Dies zeigt auch die Summenverteilung der Unebenheiten (vgl. Abbildung 5-83): ca. 85 bis 98 % der Unebenheiten liegen innerhalb der vertraglich vorgegebenen Grenze von 4 mm.



Abbildung 5-83: Summenverteilung der Unebenheiten

Die Ebenheitsanalyse mittels örtlicher Frequenzanalyse (vgl. Abbildung 5-84) gibt Aussage darüber, welche Länge die einzelnen Unebenheiten aufweisen.



Abbildung 5-84: Örtliche FFT der Ebenheitsmessungen für links (oben) und rechts (unten) pro Fahrspur

Zum einen sind im rechten Bereich bei 5 sowie 10 m klare Peaks in allen Messungen erkennbar. Hierbei handelt es sich um die Betonplattenlänge. Der Beton wird alle 5 m eingeschnitten, um Risse an den Stellen zu gewährleisten, an denen die Bewehrung eingebracht wurde. Weiter lässt sich erkennen, dass nahezu alle anderen Wellenlängen im Bereich zwischen 1 und 2 m liegen.

5.1.4.3 Analyse am Beispiel Köln-Wahn & Wittlich

Diese Untersuchungen wurden durch neuere Erkenntnisse an den Baustellen Köln-Wahn und Wittlich ergänzt. Der Fertiger wurde dazu mit erweiterter Messtechnik ausgestattet. Nähere Details dazu sind in der Beschreibung zum Lastenheft in Kapitel 2.1.1 zu finden. Eine Übersicht über die verbaute Messtechnik ist ebenso in Abbildung 5-86 dargestellt. Die Führung erfolgte dabei durch einen Leitdraht, welcher abgetastet wurde, um einen seitlichen und/oder höhenmäßigen Versatz zu korrigieren. Dazu wurden ebenso Kettengeschwindigkeit und –winkel, Hubhöhe und Neigung aufgezeichnet. Eine genaue Positionierung erfolgte zudem mittels eines GPS Empfängers, welcher durch Kalibrierung eine Absolutgenauigkeit von wenigen Zentimetern aufweist. Daneben kam eine IMU zum Einsatz, um Schwingungen zu analysieren. Des Weiteren wurde von der Firma Wirtgen eine Wetterstation direkt am Fertiger angebracht, um die Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung und Regen zu überwachen. Durch den Einbauort auf dem Flughafenareal Köln-Wahn sind zudem genaue Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes verfügbar. Für eine Überwachung der Betontemperatur direkt nach dem Einbau kam zudem eine Wärmebildkamera zum Einsatz.



Kettengeschwindigkeit,

Drehwinkel, Hubhöhe Wetterstation





Wärmebildkamera (40 Kacheln)



Abbildung 5-85: Übersicht über Messsysteme am Fertiger

Abbildung 5-87 zeigt dazu die Lage der Wetterstation des DWD im Vergleich zum Einbauort. Durch die geringe Entfernung von 2,6 km wird eine gute Übereinstimmung der Wetterdaten des Fertigers mit den Daten des DWD erwartet. Eine detailliertere Auswertung der Wetterdaten sowie ein Vergleich mit den Daten der Mischanlage sowie den manuellen Labormessungen ist in der Zusammenführung der Ergebnisse in AP A1.7 in Kapitel 5.1.7.2 beschrieben.



Abbildung 5-86: Lage der Wetterstation des DWD

In einem ersten Schritt werden gesammelte Daten des Fertigers ausgewertet. Abbildung 5-88 zeigt dazu den Verlauf der Einbaugeschwindigkeit über einen exemplarischen Tag auf der Baustelle Köln-Wahn (oben) und Wittlich (unten). Es ist zu erkennen, dass der Fertiger immer wieder gezwungen ist anzuhalten. Eine genaue Zuordnung der Stopps zu einzelnen Ereignissen ist jedoch nicht möglich, da diese Daten nicht miterfasst wurden.



Abbildung 5-87: Typisches Geschwindigkeitsprofil des Fertigers in Köln-Wahn (oben) und Wittlich (unten)

Die folgende Analyse bezieht sich dabei vor allem auf die erhobenen Daten an der Baustelle Köln-Wahn, da diese über den gesamten Einbauzeitraum vorliegen. Im Durchschnitt wurden dort folgende Kenngrößen erzielt:

- Einbauzeit: 5,2 h (+/- 0,87 h Standardabweichung))
- Anzahl der Stopps pro Tag: 75 (+/- 1

5 (+/- 19)

- Stoppdauer: 101 sec (+/- 75 s, Median: 21,5 sec)
- Anteil der Stoppdauer am Tag: 42 % (+/- 5,4 %)
- Fertigungsgeschwindigkeit 1,2 m/min (+/- 0,1 m/min)

Über den gesamten Einbauzeitraum ist in Abbildung 5-89 die Verteilung der Stoppdauer dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die meisten Stopps nur weniger als eine Sekunde dauern. Eine Häufung der Stopps bei unter einer Sekunde könnte durch das manuelle Ein- und Ausfahren bzw. Rangieren entstehen. Vernachlässigt man Stopps, die weniger als 1 sec dauern, so ergeben sich im Schnitt 54 Stopps pro Tag, was bei einer Einbauzeit

von 5,2 std einem Stopp alle 5 min entspricht. Stoppzeiten, welche länger als 600 sec (10 min) dauern, sind meist Pausen oder Einbauproblemen zuzuordnen. Es liegen jedoch keine detaillierten Aufzeichnungen der Transportkette bzw. auftretender Ereignisse vor, um dies konkreten Punkten zuordnen zu können.



Abbildung 5-88: Verteilung der Stoppzeiten über alle Einbautage in Köln-Wahn



Abbildung 5-89: Übersicht über IMU Messdaten. Schwarze Striche unterteilen den Messbereich in Vorlauf-, Fertigung-, Nachlauf- und Standphase.

Die Rohdaten der IMU sind in Abbildung 5-90 dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Beschleunigungen und Drehraten durch Vibrationen und Rauschen überlagert werden. Da der Fertiger die Daten durchgehend aufgezeichnet hat, ist es möglich, die Datenaufzeichnung in einzelne Phasen zu trennen. Diese weisen unterschiedliche Charakteristika auf. Während der ersten 2 std wird die Maschine in Betrieb genommen und zum Einbauort gefahren. Diese Phase wird im Folgenden als Vorlauf bezeichnet. Darauf folgt der reguläre Einbau, welcher ca. 4,5 std andauert. Im Anschluss folgt eine Nachlaufphase und zum Schluss wird der Fertiger abgestellt. Die Messaufzeichnung wird jedoch erst am Ende des Arbeitstages beendet, sodass eine durchgehende Aufzeichnung der Wetterdaten, welche insbesondere für eine Rekonstruktion des Aushärtevorgangs und damit die Nachbearbeitung relevant ist, erfolgen kann.

Um die angeregten Schwingungen und insbesondere deren Frequenzen zu identifizieren, kann eine Fourier Transformation durchgeführt werden. Abbildung 5-91 zeigt das dabei gewonnene Frequenzspektrum für die drei Beschleunigungsrichtungen. Die Amplituden P sind dabei jeweils auf ihren maximalen Wert normiert dargestellt. Dadurch lassen sich die jeweils dominanten Frequenzen übersichtlicher darstellen. Das Frequenzspektrum zeigt, dass insbesondere Frequenzen zwischen 30 und 45 Hz angeregt werden. Diese werden durch den Betrieb der Motoren angeregt. Im Stillstand fällt die Amplitude deutlich geringer aus, was anhand der normierten Darstellung nicht direkt zu erkennen ist. Während des Fertigungsvorgangs treten jedoch auch Frequenzen bei 0,73 Hz und 1,45 Hz auf. Hochfrequente Anregungen, welche durch Vibrationen entstehen, können mithilfe eines Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 0,5 Hz herausgefiltert bzw. unterdrückt werden.



Abbildung 5-90: Frequenzanalyse der am Fertiger aufgenommenen IMU Daten unterteilt in Vorlaufs-, Fertigungs-, Nachlauf- und Stillstandsphase

Wendet man diesen Filter an, so ergibt sich das in Abbildung 5-92 gezeigte Beschleunigungssignal. Man erkennt deutlich, dass die Vibrationen gut herausgefiltert werden können. Es zeigt sich, dass die IMU Daten nur bedingt auftretende Beschleunigungen während der Anfahrvorgänge abbilden können. Dies liegt dann insbesondere an den geringen Geschwindigkeiten des Fertigers. Dadurch ist eine Stützung der GPS Daten nur bedingt möglich. Jedoch können die Daten der IMU dazu verwendet werden, um die räumliche Lage des Fertigers zu beschreiben. In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Beschleunigungssensoren eine Lageänderung in Längsrichtung gut widerspiegeln können. Mithilfe der IMU konnten damit dominante Frequenzen während verschiedener Phasen des Betriebs identifiziert werden. Diese können dazu verwendet werden, um auftretende Schwingungen an sensibler Messtechnik zu dämpfen, um deren Messgenauigkeit zu erhöhen. So ist es z.B. denkbar, Oberflächenscans direkt am Fertiger durchzuführen, um Unebenheiten bereits frühzeitig zu identifizieren. Zusätzlich können die Daten der IMU zur Stützung von Neigungsinformationen genutzt werden. Weitergehende Betrachtungen sind momentan jedoch nicht durchgeführt worden.



Abbildung 5-91: Vergleich der gefilterten IMU Daten und Korrelation zur Geschwindigkeit und Neigung.

In einem ersten Schritt, zur frühzeitigen Überwachung der Betonqualität direkt nach dem Einbau, wurde der Fertiger von der Firma Wirtgen mit einer IR-Wärmebildkamera zur Messung der Oberflächentemperatur ausgestattet. Abbildung 5-93 zeigt dazu den Verlauf der Messwerte der 40 aufgezeichneten Kacheln über einen Tag. Mit Beginn des Einbaus nach ca. 110 min ist ein deutlicher Temperaturanstieg erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der frisch eingebaute Beton eine höhere Temperatur als der Boden aufweist. Nach ca. 230 min wird der Einbauprozess kurzzeitig gestoppt, da der Fertiger den Graben in der Mitte des Einbaufeldes überqueren muss. Dadurch entsteht der kurzzeitige Ausreißer in den Messdaten. Durch die höhere Außentemperatur steigt auch die Temperatur des eingebauten Betons über den Tag leicht an. Nach Ende des Einbaus ist ein weiterer Sprung in der Temperatur erkennbar. Dieser ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der Fertiger zum Abstellplatz gefahren wurde und dort die Oberflächentemperatur aufgrund der Sonneneinstrahlung bereits höher war. Weitere Abweichungen der Temperaturen und die ungleichmäßige Verteilung über die Kacheln sind eventuell durch Sonneneinstrahlung und einen zusätzlichen Wärmeeintrag über die Abgase des Fertigers bedingt und werden im weiteren Verlauf des Projektes korrigiert.



Abbildung 5-92: Temperaturdaten der Wärmebildkamera über die aufgezeichneten 40 Kacheln

5.1.4.4 Nachweis der Dübellage am Beispiel der Maßnahme A1 Salmtal-Wittlich

5.1.4.4.1 Sachlage/Thematik

Zur Sicherstellung der Lastübertragung und der gleichen Höhenlage benachbarter Platten im Betonstraßenbau werden die Querscheinfugen verdübelt. Die zu Grunde liegenden Regelwerke besagen, dass die Dübellage zerstörungsfrei ermittelt werden soll. Die Messung wurde in Anlehnung an das FGSV-Arbeitspapier (Prüfung der Lagebestimmung von Dübeln und Ankern in Fahrbahndecken aus Beton) mit dem Pulsinduktionsmessgerät MIT-SCAN-II durchgeführt.

Gemäß den ZTV Beton-StB 07 darf die Schräglage höchstens 20 mm, bezogen auf die Dübellänge von 50 cm betragen. Die Abweichung der Höhenlage darf ein Maximum von 20 mm, die Verschiebung senkrecht zur Fuge, in Fahrbahnrichtung, maximal 50 mm. betragen.

Je nach Fehllage der eingemessenen Dübel kann eine Abweichung der drei zu prüfenden Parameter nach ZTV-Beton -StB 07 (Höhenlage, Verschiebung und Schräglage) durch diverse Gründe verursacht worden sein. Unter anderem sind eine Fehleinstellung des Dübelsetzers am Betonfertiger, eine nicht abgestimmte und über den Fahrbahnquerschnitt schwankende Konsistenz des Betons sowie der falsche Absetzzeitpunkt der Dübel, eine mögliche Ursache für Dübelfehllagen. Aus den genannten Gründen ist es erforderlich, die Dübellage zu prüfen und ggf. anzupassen.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass es sich bei dem angewandten Messvorgang der Pulsinduktionsmessung (Wirbelstromverfahren) des MIT-SCAN um ein indirektes Verfahren handelt. Dies hat zur Folge, dass keine direkte Aussage wie beispielsweise bei der Untersuchung eines Bohrkerns getroffen werden kann, sondern dass lediglich indirekt über eine Interpretation von physikalischen Messbildern (Änderung der Signalstärke, Verlauf) eine Bewertung möglich ist. Neben Ungenauigkeiten des Messvorgangs kann die Interpretation der Messbilder nur ein relatives Ergebnis wiederspiegeln.

5.1.4.4.2 Messanordnung und Messmethodik

Um eine hinreichende Aussage über die Lage der Dübel treffen zu können, wird eine Messung direkt auf der Querscheinfuge durchgeführt. Die Messfahrt beginnt am Ende des Standstreifens und verläuft, über die erste Fahrspur bis zum Ende der zweiten Fahrspur. So werden die Dübel in Fahrtrichtung gesehen von rechts nach links nacheinander eingemessen.

Das Verfahren der Pulsinduktionsmessung, auch Wirbelstromverfahren genannt, basiert auf einem vom Gerät (MIT-SCAN-II) erzeugten magnetischen Feldes, welches in metallischen Objekten Wirbelströme hervorruft. Die genannten Wirbelströme wiederrum erzeugen ein veränderliches magnetisches Feld, welches vom Gerät über mehrere Empfangsspulen detektiert wird. Das Messgerät ist als schienengebundener Messwagen aufgebaut, welcher in langsamer Schrittgeschwindigkeit über das Schienensystem gezogen wird (siehe Abbildung 5-94).

Bei einer Breite von einem Meter kann eine Länge von bis zu 15,5 m über eine Messfahrt mit dem Gerät ermittelt werden.

Bedingt durch die Ungenauigkeit des Messverfahrens des MIT-SCAN sind folgende Toleranzen bei der Auswertung einzukalkulieren:

- Absolute Tiefe ± 4 mm
- Seitverschiebung (Δy) ± 8 mm
- Horizontale Schräglage (sh) ± 4 mm
- Vertikale Schräglage (sv) ± 4 mm

Unabhängige Messvorgänge an der gleichen Querscheinfuge haben gezeigt, dass die vorgenannten Grenzabweichungen der Dübelmessung positiv unterschritten wurde. Dies spricht einerseits für die relative Genauigkeit der Messung als auch für eine gute bis sehr gute Reproduzierbarkeit.



Abbildung 5-93: Schematische Versuchsdurchführung der Dübellagenmessung

5.1.4.4.3 Koordinatensystem

Bedingt durch den Messvorgang vom Standstreifen über die Querscheinfuge in Richtung des Mittelstreifens ist die X-Achse gleichzusetzen mit der Querscheinfuge. Der Ursprung dieser Achse liegt am Beginn des Standstreifens. Ein Versatz zum Regelabstand der Dübel wird daher dx bezeichnet. Die Y-Achse liegt in der Fahrbahnoberfläche und verläuft in Fahrtrichtung der Autobahn. Abweichungen werden dementsprechend dy betitelt. Positive Überschreitungen (+ dy) zeigen, dass der Dübelschwerpunkt in Messfahrtrichtung rechts von der Querscheinfuge (in Fahrtrichtung hinter der Fuge) liegen, wogegen ein negatives Vorzeichen des dy-Wertes (- dy) eine Verschiebung links zur Querscheinfuge (in Fahrtrichtung vor der Fuge) anzeigt. Die Z Koordinate gibt Aufschluss über die Tiefenlage der Dübel. Die entsprechende Achse (Z Achse) verläuft somit von der Fahrbahnoberfläche senkrecht in die Tiefe. Somit geben positive Abweichungen (+ dz) zur Sollhöhe an, dass der Dübel zu tief liegt, wogegen negative Abweichungen (- dy) zeigen, dass der Dübel nicht tief genug in die Betondecke ein gerüttelt wurde. Der zu prüfende Parameter "Schräglage (s)" setzt sich im Gegensatz zur Verschiebung und zur Höhenlage aus zwei Komponenten, einer horizontal-Komponente (sh) und einer vertikal-Komponente (sv) zusammen (vgl. Abbildung 5-95). Diese beiden Komponenten sind nach dem Satz des Pythagoras gleichwertig einzubeziehen.



Abbildung 5-94: FGSV AP 67 (Bild 1): Koordinaten und Messgrößen zur Beschreibung der Dübellage

5.1.4.4.4 Auswertung

Am 04.12.2019 sind insgesamt 66 Querscheinfugen mit einer Summe von etwa 2.838 Dübeln eingemessen worden.



Abbildung 5-95: Messung der Dübellage

Vereinzelt konnten Querscheinfugen nicht gemessen werden, da Regenabläufe einen Abbruch des Messvorgangs hervorgerufen haben. In diesem Falle wurde die entsprechende Fuge übersprungen.



Abbildung 5-96: Messabruch wegen Störquelle

Dateinar	me: 04121035.HDF										Seite 2 von 3
		.0-	ů×.	-	4×			Dibel 43			
10780					T	10801	133	-30	13	-3	
10680											
10580		- 42			0			Dübel 42			
10480	Manager and Party of the	19				10549	123	-39	5	-17	INFORMATION
10380											Autobahn: A 1
10280		-41-			\$	10278	142	Dubel 41	23		Fahrtrichtung:
10180						Interio	144			-	Fahrstreifen: Standstreifen
10080			-					Dúbel 40			Fuge: 97/98
9980		- 40			9	10028	124	-48	8	-16	Sollbetondicke: 270 mm
9880											Dübelsorte: 500 x 25.0
9780		- 39			*			Dübel 39			Einheit: Millimeter
9680	a literative set					9/94	146	-43	'	-4	
9580								Dübel 38			
9480		- 38			9	9541	129	-43	2	-5	
9380											LEGENDE
9280		- 37	-		-			Dúbel 37			24406
0100					T	9289	141	28	11	28	20920
0000	A Local Date				-			Dilbert M			17433
9080		- 36			9	9044	127	-43	9	-14	10460
6350	Sheet and Sheet										6973
6550		. 16	-	-	1			Dúbel 35			3487
8/80	Alley Alley	35			T	8787	145	-29	9	-0	0
8680								Dilbel 24			
8580		- 34			G	8536	130	-46	-1	-15	
0400											V2 72 AL 24 24
8380	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			-				Dübel 33			xs - Dübelabstand
6200					Ĩ	8288	140	-45	8	-5	zs - Höhenlage
6160								Dübel 32			sh - Horiz, Schräglage
8080		- 32			4	8043	137	-37	4	-16	sv - Vert. Schräglage
7980											* - Normtiefe
7880	and the lot of the	- 31		-	+			Dübel 31		002200	+ - Linkes Stabende
7780					1	7804	137	-44	10	-15	Complete Complete
7680		10						Dúbel 30			
7580		- 30			9	7558	134	-44	6	-18	
7480											
7380		- 29			0	-		Dúbel 29			
1280						/311	140	-50	۰	-15	
7180	أألف سيبط الأ							Dübel 28			
7080							nic	ht vorhan	den		
6980											
6000		- 27			4	C	170	Dübel 27		.24	
6/80		1.55				0014	130	-51	-		
0000	Contraction of the	Sec. 1	100					Dübel 26			
6380	and the second	- 26			9	6560	133	-44	-2	-16	
6380											
6280		- 25			4	6312	143	-52	-3	-17	
6180											
6080		~		_				Dübel 24			
5980		24			1	6060	134	-35	0	-9	
5880								Dübel 23			
5780		- 23	-			5810	148	-35	11	-0	
5680											
5580	Contractory.	- 22		-	-	5557	135	-35	5	-13	
5480		C. San San	100 million		1					187	
	-200 0 200		0	y	135° Z						MagnoProof MIT GmbH

Abbildung 5-97: Exemplarische Auswertung einer Dübellagenmessung

5.1.4.4.5 Ergebnis und Fazit

Anhand der Messergebnisse ist zu erkennen, dass die Dübellage der Baumaßnahme A1 Salmtal Wittlich mit hoher Genauigkeit nachgewiesen werden konnte. Es ist festzuhalten, dass weitestgehend alle eingemessenen

Dübel die Anforderungen nach den ZTV Beton StB 07 erfüllen. Die notwendige Sicherstellung der Lastenübertragung zwischen den Platten ist somit nachgewiesen und gewährleistet.

Höhenlage:

Aufgrund einer Betonstärke von 270 mm (Ober- plus Unterbeton) wurde der Dübelsetzvorrichtung auf eine Sollhöhe von 135 mm eingestellt. Über die gesamte Messstrecke halten gemittelt 98,4 % der Dübel die geforderte Höhenlage mit einer maximalen Abweichung von 20 mm ein (4 mm Gerätetoleranz werden hinzugerechnet). Auf alle gemessenen Abweichungen gerechnet, liegen jedoch 85 % unter 10 mm (4 mm Gerätetoleranz werden hinzugerechnet). Tendenziell ist zu erkennen, dass die Dübel außen etwas tiefer liegen und allmählich zum Mittelstreifen ansteigen, d.h. dass die Dübel näher an der Betonoberfläche liegen.



Abbildung 5-98: Höhenlage der Dübel

Verschiebung:

Hinsichtlich der Verschiebung (nach links und rechts) von der Querscheinfuge (dy-Richtung) ist festzuhalten, dass 95,2 % aller gemessenen Dübel die geforderte Toleranz von 50 mm (+ 8 mm Gerätetoleranz) erfüllen. Ein Maximum in der Verschiebung ist bei Kilometer 109,520 vorzufinden. Ein durchgehend negatives Vorzeichen der Messwerte deutet darauf hin, dass hier der Fugenschnitt falsch gesetzt wurde oder, dass der Dübelsetzer zu spät heruntergelassen wurde (Einbaurichtung entgegen der Fahrtrichtung).

Obwohl die Abweichungen noch im Rahmen der zulässigen Grenzwerte der Verschiebung senkrecht zur Querscheinfuge sind, ist bei der Auswertung auffällig, dass im Mittel der Schwerpunkt aller Dübel in Fahrtrichtung vor der Querscheinfuge liegt (negativer dy-Wert im Mittel über alle Dübel bei 25 mm). Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass entweder die Dübel über den Betonfertiger zu früh abgesetzt wurden oder dass der Fugenschnitt systematisch falsch gesetzt wurde.

Ein automatisiertes Verfahren zur Kennzeichnung der exakten Dübellage für den nachfolgenden Kerbschnitt könnte hier zu einer Verbesserung der Ausführungsgenauigkeit beitragen.



Abbildung 5-99: Längsverschiebung von Dübeln

Schräglage

Auch die Erfassung der Schräglage zeigt, dass über 91 % der eingemessenen Dübel die gegebenen Anforderungen an die maximal zulässige Toleranz von 20 mm einhalten (+ 4mm Gerätetoleranz in vertikaler und horizontaler Richtung). Bei der Betrachtung der horizontalen Schräglage sind keine systematischen Auffälligkeiten (Mittlere horizontale Schräglage von lediglich 1,6 mm) zu erkennen. Eine detaillierte Untersuchung der vertikalen Schräglage zeigt jedoch, dass die Dübel gemittelt in Fahrtrichtung eine minimal ansteigende Höhenlage aufweisen (Mittlere vertikale Schräglage von etwa 15 mm).

5.1.4.5 Laboruntersuchungen zum Verdichtungsverhalten und zur Packungsdichte

In ersten Laborversuchen zum Verdichtungsverhalten mit dem Gyrator (vgl. Abbildung 5-100) zeigte sich rasch, dass die Ermittlung von realitäts- respektive praxisnahen Parametereinstellungen in Abhängigkeit der Konsistenz ohne einen direkten Vergleich mehr als schwierig ist.



Abbildung 5-100: Gyratorprobe mit Ausfallkörnung (rechts) und stetiger Sieblinie (links).

Mit der Verfügbarkeit des Experimentalprüfstands (vgl. Abschnitt 6.2.4) soll in weiteren, über das Verbundvorhaben hinausführenden Kooperationen zwischen IWB, MPA und Wirtgen, entsprechende Versuche vorangetrieben werden, um die für den Fertiger passenden Einstellungsparameter herauszuarbeiten. Die entsprechenden Versuche mit in der Praxis erprobten Oberbetonrezepturen umfassen gezielt die Verwendung einer stetigen Sieblinie. Zudem werden Versuche mit einer Sieblinie mit Ausfallkörnung (z.B. Wittlich II) durchgeführt. Hier wird nach der erfolgten Verdichtung händisch das Bürsten zu einer Waschbetonoberfläche simuliert.

Die Untersuchungen bezüglich einer optimierten Packungsdichte wurden parallel der Baustellenanalysen am IWB durchgeführt. Hierfür werden zunächst die tatsächlich in der Praxis eingebauten Straßenbetone Wittlich-Salmtal für die Versuche herangezogen. Zusätzlich wurde angestrebt, neben der Optimierung der Packungsdichte mit der Software BétonlabPro (Compressible Packing Model) zum Vergleich auch weitere Programme mit anderen Optimierungsmodellen (modifiziertes ANDREASSEN-Modell) anzuwenden, um die jeweilige Praxistauglichkeit zu untersuchen. Die gewählten Optimierungsmodelle wurden in Laborversuchen validiert.

5.1.5 A1.5 - Nachbearbeitung der Oberbetonlage – Herstellung der Waschbetonoberfläche und Schneiden der Fugen

Inhalt des Arbeitspaketes ist die Analyse der manuellen Feststellung des Ausbürstzeitpunktes, zu dem eine ausreichende Erhärtung des jungen Betons erfolgte, um schadenfrei den Oberflächenmörtel, der mittels Verzögerer am Erhärten gehindert wurde, durch Bürsten mechanisch zu entfernen. Dem richtigen Zeitpunkt des Ausbürstens kommt eine große Bedeutung zu, da bei zu frühem Bürsten die Körner keinen ausreichenden unterseitigen Verbund zur Mörtelmatrix haben und somit die Körner nicht ausreichend in die Mörtelmatrix eingebunden sind und somit aus der Oberfläche herausgerissen werden. Wird das Bürsten zu spät vorgenommen, lässt sich der verzögerten Oberflächenmörtel nicht in ausreichender Qualität und Tiefe herausbürsten, so dass die Anforderungen an die Griffigkeit und den Lärmschutz nicht eingehalten werden. Ferner soll auch die Methodik und Überprüfung der Feststellung des Zeitpunkts analysiert werden, der zum Schneiden der Quer- und Längsfugen gewählt werden muss.

Auch dem richtigen Zeitpunkt des Fugenschneidens kommt eine zentrale Bedeutung zu, da bei zu frühem Schneiden Gesteinskörner der Oberfläche aus der Matrix herausgerissen werden und bei zu spätem Schneiden sich infolge der fortschreitenden Hydratation Zwangsbeanspruchungen in der Fahrbahnplatte aufbauen, die zu einer unkontrollierten Rissbildung führen.

Von weiterem Interesse ist die Feststellung der örtlichen Festlegung der Anordnung der Querfugen. Hier werden für die spätere Festlegung der Lage der Querfuge im Nachgang an den Einbau und die Verdichtung in die geglättete Fahrbahnoberfläche ein Stempel in den noch frischen Oberbeton eingedrückt, der als Lageinformation zur Anordnung der Querfuge dient.

Um die Zeitpunkte für das Bürsten und das Schneiden besser bestimmen zu können, wurde an der MPA Universität Stuttgart ein Ultraschallmessverfahren weiterentwickelt und im Baustelleneinsatz erprobt, mit dem bei einer entsprechenden Eignung die personenveranlasste Festlegung der Zeitpunkt für die Durchführung des Bürstens und des Fugenschneidens künftig im Sinne einer Qualitätsverbesserung mit belastbaren Zustandsbewertungen des noch jungen Fahrbahnbetons unterstützt werden kann.

In den folgenden Kapiteln wird das aktuelle Vorgehen auf Basis der Baustellenbegehungen analysiert sowie erste Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Erstarrungsendes vorgestellt.

5.1.5.1 Analyse des aktuellen Vorgehens zur Bestimmung des richtigen Ausbürst- und Schneidzeitpunkts

Bei der bisherigen Baustellenbegehung wurden die Vorgehensweisen beim Fugenschnitt und beim Ausbürsten analysiert. Hier spielt die Erfahrung der ausführenden Mitarbeiter eine maßgebliche Rolle. Der Zeitraum zwischen Betonfertigstellung und Ausbürstzeitpunkt bzw. Schneidzeitpunkt variiert stark je nach Betonrezeptur, Witterung, Standzeiten und weiteren Einflüssen. Mittels manueller Prüfung werden bisher die richtigen Zeitpunkte für das Ausbürsten der Oberfläche und das Schneiden bestimmt. Zur Bestimmung des Ausbürstzeitpunktes werden Ausbürst-Versuche von Hand mit einem Stahlbesen in einem kleinen Testfeld gemacht, bis der Mitarbeiter durch seine Erfahrung feststellt, dass der Beton reif für das maschinelle Bürsten ist. Der richtige Schneidzeitpunkt wird durch das Überwachen der Oberflächenhärte mittels Ritzen mit einem harten Gegenstand in die Fahrbahnoberfläche sowie der Farbe des Kratzers und der gefühlten Oberflächentemperatur bestimmt. Diese Prüfmethoden sind wenig objektiv und in der Ergebnisbewertung sehr abhängig von der Erfahrung des ausführenden Personals. Hier ist eine technische Lösung anzustreben, die zuverlässig den Zeitpunkt der entsprechenden Nachbehandlung ermittelt und als Hilfsmittel zur Risikominimierung dienen kann. Denkbar wäre es, besonders zu Schichtbeginn, ein Gerät am Anfang der zu bearbeitenden Betonfläche aufzustellen, dass das Personal rechtzeitig auf den bevorstehenden Arbeitsbeginn hinweist. Ein solches System wurde im AP B2.2 entwickelt und wird im Weiteren in Abschnitt 6.2.2 vorgestellt.

Nachdem Einbauzeitpunkt und Standzeiten beim Betonieren gleichermaßen wie Rezepturänderungen starke Auswirkungen auf die nachlaufenden Bearbeitungsschritte haben, ist hier ein verbesserter Informationsfluss zwischen Mischmeister, Einbauteam und dem Personal, das die nachführenden Arbeiten ausführt, anzustreben. Die kann beispielsweise durch die o. g. Vernetzung der am Fahrbahnbau Beteiligten erreicht werden. Hierdurch können Fehleinschätzungen bei den nachlaufenden Arbeiten vermieden werden.

5.1.5.2 Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Erstarrungsendes

Am IWB wurde ein Gyrator beschafft, um das Verhalten des erstarrenden Betons zu charakterisieren. Das durch den hochgenauen Wegaufnehmer sehr empfindliche Messgerät bestimmt durch eine Kompression der Gyratorprobe mittels einer Druckmanschette die Kompressibilität des verdichteten Betons. Über den auf der Probe angebrachten Wegaufnehmer wird die relative Deformation aufgenommen (vgl. Abbildung 5-101). Das Erstarrungsende lässt sich mit dem Ende der nicht mehr messbaren Deformation gleichsetzten. Der in Abbildung 4.102 gezeigte Beton hat somit nach 210 min sein Erstarrungsende erreicht.



Abbildung 5-101: Erstarrungsverhalten einer Gyratorprobe.

Inwiefern das Erstarrungsende Rückschlüsse auf den Schneid- bzw. Ausbürstzeitpunkt zulässt, muss im Rahmen des im Verbundvorhaben zu realisierenden Experimentalprüfstand und/oder bei Versuchen in situ ermittelt werden.

5.1.5.3 Dokumentation auf der Baustelle Köln-Wahn

Im Zuge der Baustellenanalyse in Köln-Wahn wurde der Beginn der Nachbearbeitung durch die Mitarbeiter der Firma OAT dokumentiert (vgl. Abbildung 5-102). Dabei wurde aufgezeichnet, in welchem Zeitraum der Fugenschnitt erfolgte und welche Wetterbedingungen während des Schneidens herrschten. Ein Beispiel eines Schnittprotokolls ist in Abbildung 4.103 dargestellt. Im ersten Fall a) erfolgte der Fugenschnitt für die Bahn 7 ab 15:30 und dauerte bis 18:30 an. Der Einbau begann an diesem Tag um 7:00. Damit wurde der erste Fugenschnitt 8,5h nach Einbau bei Sonnenschein und 30°C Lufttemperatur durchgeführt. Im Gegensatz dazu ist in b) der Zeitpunkt für den Fugenschnitt erst um 19:00 erfolgt bei Baubeginn ab 8:00. Damit erfolgte der Fugenschnitt erst etwa 11h nach Einbau. Ein erstes Indiz für die Abweichung der Schnittzeiten bietet die Temperatur und Sonneneinstrahlung an den beiden Einbautagen. Im ersten Fall erfolgte der Fugenschnitt an einem sonnigheißen Tag, im zweiten Fall an einem bedeckten Tag. Die Unterschiede in der Temperatur sind ebenso in Abbildung 5-103 dargestellt. Dort ist die Temperaturverteilung und Sonnenscheindauer während des Einbauvorgangs am Fertiger dargestellt. Insgesamt zeigt sich dadurch, dass der Zeitpunkt des Fugenschnitts mitunter stark von den Umgebungsbedingungen abhängt. Zusätzlich können sich Unterschiede ebenso durch unterschiedliche Betonrezepturen und in der Rezeptur verwendete Verzögerer ergeben, welche in diesem Zusammenhang jedoch nicht vorlagen. Entscheidend für den spätesten Zeitpunkt ist generell der Betonkörper und nicht die Oberfläche. In der Regel erfolgt das Bürsten dabei deutlich vor dem Schneiden.

a)	ARBEITSE	BERICHT FL	JGENSCHN	IEIDEN			A
Baustelle:	×	Köln-Wah	2	Wochentag	Datum:	28.6	. 18
	Nom-wann			Arbeitszeit:	von	Uhr bis	Uhr
Schneidfirma:	Fa. Otto Alt	e-Teigeler Gr	nbH; Niederla	ssung Bietigh	neim		
Personal:	Vorarbeiter:						
	Maschinist 1:	_		Maschinist 3:		1	
4	Maschinist 2:			Maschinist 4:			1
Geräte-	Querfugen:	. 1	Stück	Gerät:	2x FS 41 Lissn	nac Querk	08U
einsatz:	Längsfugen:	1	Stück	Gerät:	2x FS 41 Lissn	nac Längs	sbau
	Wasserbehälte	r: 4		Liter	4.000		
	Wie und wann	wird der Schr	eidschlamm ei	ntfernt:	saugen		
Schnittiefe Kerbsch	nnitt:	quer	11 cm	Schnittiefe F	ugenschnitt:		cm
Schnitttiefe Kerbsc	hnitt:	längs	16 cm	Schnittbreite	Fugenschnitt:	v.	cm
wie wurden die Län	gsscheinfuge	en geschnitte	n:				
Reihenfolge:	gleichzeitig,	oder erst	Ls	Lsf, evtl. d	ann	Lsf	
		Abstand der	Längsfugens	chneidgeräte:	: m		
Wetterbedingunger	beim Fugen	schneiden (m	indestens jed	le Stunde eine	Aufzeichnung):	4
Uhrzeit Sta	tion längs	Station quer	Witterung	Temp. (°C)	. 20		20
79 Barn	171 (2)		Soune	30	1500	- 1	8=
2	_ U						
b)		,					
Uhrzeit Sta	tion längs	Station quer	Witterung	Temp. (°C)	T	<u>.</u>	
8= Barn.	[7](3)		bidicht	72	1900	- 71	GC
						(C-``	<i>p</i>

Abbildung 5-102: Auszug aus den Schnittprotokollen zur Nachbearbeitung vom 28.06.2018 (a) und 18.06.2018 (b)



Abbildung 5-103: Temperatur- und Sonnenscheinverlauf am Fertiger während der beiden betrachteten Einbautage

5.1.5.4 Dokumentation auf der Baustelle Wittlich II

Auf der Baustelle Wittlich II wurden dazu erste Funktionalitäten einer digitalen Erfassung von Messdaten und automatischen Speicherung in der Datenbank des Prozessleitsystems sowie der Anzeige in einem Webframework, welches in AP C entwickelt wurde, erprobt. Dazu wurden Formulare erstellt, welche sich auf einem Handy oder Tablet einfach und effizient ausfüllen lassen, sodass nur eine geringe Mehrbelastung der Arbeiter entsteht. Eine detaillierte Auswertung der so erfassten Daten ist in AP C3.3 in Kapitel 7.3.3.4.1 gegeben. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Erfahrungen im Einsatz bei der Nachbearbeitung gegeben.

Bei dieser Baumaßnahme wurde erstmals versucht, die Arbeitsprotokolle online über Tablets auszufüllen. Die Protokolle auf der vorhergehenden Baustelle waren nicht zufriedenstellend, da diese wenig detailliert waren. Die Hoffnung war, dass durch Vereinfachung des Ausfüllprozesses mehr Daten gesammelt werden können. Zudem können die digital eingegebenen Daten direkt im Rahmen des Forschungsvorhabens weiterverarbeitet werden und müssen nicht von Hand in digitale Tabellen übertragen werden, wie es bei handschriftlichen Protokollen der Fall ist. Ein weiterer Vorteil ist die direkte Informationsmöglichkeit für die Bauleitung. Ohne persönliche Rückmeldung kann der zuständige Mitarbeiter die Fortschritte, die üblicherweise in der Nacht erfolgen, erkennen und ist über das Ende der Arbeitszeit informiert. Auf dieser Basis können personelle Engpässe und Entwicklungen frühzeitig erkannt werden und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Mitarbeiter durchaus positiv auf die Möglichkeit der digitalen Protokollbearbeitung reagieren. Teilweise wurden die Protokolle kontinuierlicher und durch Pflichtfelder verantwortungsvoller ausgefüllt. Ein großes Hindernis war die schlechte Netzabdeckung im Bereich der Baustelle, die selbst bei motivierten Mitarbeitern zu geringerer Motivation und somit zu weniger Protokolleingaben führten.

5.1.6 A1.6 - Analyse der Beschaffenheit und Ebenheit der Fahrbahnoberfläche bei heutiger Herstellung von Betonfahrbahnen

Die Steuerung des Gleitschalungsfertigers erfolgt i.d.R. über einen sogenannten Leitdraht. Hierzu wird vor dem Einbau der Betondecke beidseitig der Einbaustrecke eine sogenannte Drahtanlage errichtet (vgl. Abbildung 5-104). In einem fest definierten Abstand zur Fahrbahn werden Führungsstangen im Regelabstand von 5m in den Untergrund eingebracht. An diesen werden Drahthalter mittels Klammern befestigt, welche der Aufnahme des Leitdrahts dienen. Dieser Draht dient dem Gleitschalungsfertiger als Referenz für die Höhe und Lage der Betondecke. Hierbei muss großes Augenmerk auf die genaue Ausführung gelegt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Drahtanlage vor jedem Einbaubeginn zu prüfen ist. Wie sich herausgestellt hat, kann sich infolge von Temperatureinwirkung ein Durchhang des Leitdrahts zwischen den einzelnen Drahthaltern einstellen. Dieser wird durch eine Temperaturdehnung des Drahtes hervorgerufen. Ein "Nachspannen" der Drahtanlage kann dieser Punkt ausmerzen.



Abbildung 5-104: Einzelkomponenten einer "Drahtanlage"

5.1.6.1 Oberflächenmodellierung aus Laserscannerdaten

Die konventionellen Verfahren der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen analysieren die Längsebenheit von Fahrbahnoberflächen anhand eines linienhaften Profilschnittes (i. d. R. die rechte Rollspur je Fahrstreifen). Um Fahrbahnoberflächen entsprechend ihres dreidimensionalen Charakters adäquat bewerten zu können, sollte jedoch eine flächenhafte Erfassung und perspektivisch auch eine Bewertung erfolgen. Die Technologie des mobilen Laserscannings ermöglich eine schnelle, präzise und flächendeckende dreidimensionale Oberflächenerfassung. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen zur Überführung von Laserscans in 3D Oberflächenmodelle erläutert.

Das Rohdatenprodukt, dass aus der Synchronisation der Polarkoordinatenmessungen des Laserscanners mit den Positions- und Orientierungsdaten des Positionierungssystems entsteht, ist eine unorganisierte 3D-Punktwolke. Da die Erfassung durch den PPS Laserscanner mit ca. 1 Million Punkte je Sekunde erfolgt, entstehen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit des Messfahrzeuges sehr dichte 3D-Daten mit mehreren zehntausend Messpunkten pro Quadratmeter. Für eine performante und zweckorientierte Datenverarbeitung können aus den Oberflächenscans Oberflächenmodelle berechnet werden. Typische Oberflächenrepräsentation ist das TIN (unregelmäßiges Dreiecksnetz). Dabei werden die einzelnen 3D-Punkte nach einer bestimmten Regel, z. B. nach der Delauney-Methode, so verbunden, dass zwischen ihnen Dreiecksflächen entstehen. In Geographischen Informationssystemen (GIS) werden häufig gerasterte Oberflächenmodelle (Grids) verwendet. Sie haben eine Matrixstruktur und sind im Grunde wie ein Bild aufgebaut, nur, dass pro Pixel keine RGB-Werte, sondern beispielsweise Höhenwerte hinterlegt sind. Die Auflösung kann dabei an den jeweiligen Anwendungszweck angepasst werden. Für die Anwendungsdomäne Straße ist dieses klassische GIS-Raster nicht immer optimal. Hier bietet ein Ansatz aus dem Automotive-Bereich eine adäquate Möglichkeit der Straßenoberflächenmodellierung [Rauh 2008]. Das Datenformat Curved Regular Grid (CRG) definiert zunächst eine Fahrtachse. Entlang dieser werden dann regelmäßig orthogonale Profile konstruiert (Querprofile). Auf jedem Querprofil werden wiederum in einem regelmäßigen Abstand Punkte abgetragen zeigt Abbildung 5-105 schematisch das CRG-Format bestehend aus Fahrtachse, Querprofilen und darauf befindlichen Profilpunkten.



Abbildung 5-105: Schematische Darstellung der Definition eines achsbezogenen Gittermodells entlang einer Fahrzeugtrajektorie oder Straßenachse.

Diese Art der Rasterung führt zwar in den Randbereichen von Kurven zu unterschiedlichen Zellengrößen. Bei Querprofilbreiten von 4 m und regelkonformen Lageplanradien kann dieser Effekt jedoch vernachlässigt werden. Überlagert man im nächsten Schritt das regelmäßige Raster mit der unregelmäßigen 3D-Punktwolke, befindet sich immer eine unterschiedliche Anzahl von Scanpunkten in einem Rasterfeld (siehe Abbildung 5-105 rechte Teilabbildung). Jedem CRG-Profilpunkt (blau) wird nun der Höhenwert zugeordnet, der aus den sich in der betreffenden CRG-Rasterzelle befindlichen Laserscanpunkten (grün) distanzgewichtet errechnet wird. Im Ergebnis dieser Berechnung liegt ein regelmäßiges Oberflächenmodell vor, welches entlang einer Fahrbahnachse ausgerichtet ist (sieheAbbildung 5-106). Durch die klare Strukturierung der Daten innerhalb des CRG-Formats und den Achsbezug jedes einzelnen CRG-Punktes kann ein schneller Zugriff auf die Punktdaten erfolgen, was weiterführende räumliche Auswertungen im Hinblick auf Ebenheit und lokale Oberflächendiskontinuitäten ermöglicht: Längs- und Querprofile können schnell und ohne großen Aufwand an beliebigen Stellen des Modells extrahiert und ausgewertet werden. Darüber hinaus können die Oberflächenmodelle auch für 3D-Untersuchungen, wie z. B. Deformationsanalysen, verwendet werden.



Abbildung 5-106: Laserscan einer Betonfahrbahn (links) und überlagertes 3D-Oberflächenmodel im 0.1m * 0.1m Raster (rechts). An jeder Stelle des Rasters können Längs- und Querprofile extrahiert und diese hinsichtlich Ebenheit analysiert werden. Dieselbe Systematik ist auf Laserscans der Unterlage anwendbar.

5.1.6.2 Verwendete Längsebenheitsindikatoren

5.1.6.2.1 Planographensimulation

Ein klassischer geometrischer Längsebenheitsindikator ist die Simulation der gleitenden Richtlatte, die auch als Planographensimulation (PGR) bezeichnet wird (vgl. Abbildung 5-107) [FGSV 2009]. Der Indikator PGR wird berechnet, indem eine virtuelle 4m-Latte schrittweise über das digitale Höhenlängsprofil einer Straße geschoben wird. Alle 10cm wird dabei das Stichmaß unter der 4m-Latte bestimmt. Im Rahmen der Ebenheitsanalysen des Verbundvorhabens wird der betragsmäßige Maximalwert dieses Stichmaßes im Analyseabschnitt (20m) verwendet und mit PGR-MAX referenziert. Mit dem berührungslos abgeleiteten PGR-MAX Indikator können, wie auch mit seinem berührenden Pendant dem Planographen, nur punktuell kurzwellige Unebenheiten bis zu einer Wellenlänge von 4m analysiert werden.



Abbildung 5-107: Prinzipdarstellung der gleitenden 4-m-Lattensimulation [FGSV 2009].

5.1.6.2.2 Bewertetes Längsprofil

Ein moderner Bewertungsansatz für die Längsebenheit einer Fahrbahnoberfläche ist das von [Ueckermann et al. 2008] publizierte Bewertete Längsprofil (engl.: WLP-Weighted Longitudinal Profile). Der zugrundeliegende Auswerteansatz verbindet die Vorteile von konventionellen geometrischen Bewertungsmethoden und Response-Type-Methoden, wie dem International Roughness Index [Sayers et al. 1986], der auch Aspekte der Fahrdynamik berücksichtigt. Das WLP gewährleistet damit eine objektive Bewertung von unregelmäßig und periodisch auftretender Unebenheiten, aber auch von lokalen Einzelereignissen. Um die im wahren Höhenlängsprofil einer Straßenoberfläche enthaltenen kurz- und langwelligen Anregungen über den gleichen Bewertungsmaßstab (Millimeter) beurteilen zu können, werden im Zuge eines Transformationsprozesses kurze Wellen mit vergleichsweise geringen Amplituden über eine Gewichtungsfunktion betont. Da im Längsprofil einer Straße enthaltene Periodizitäten zu Resonanzerscheinungen am Fahrzeug und in der Folge zu merklichen Komforteinbußen führen können, wird zusätzlich eine spezielle Oktavbandfilterung angewendet, um insbesondere kurze, in regelmäßigen Abständen auftretende Unebenheiten einer angemessenen Bewertung zuzuführen. Abbildung 5-108 visualisiert das Berechnungsschema des WLP. Das dort aufgeführte Höhenlängsprofil h(x) wird mittels Fourier Transformation (FFT) in ein Spektrum $H(\Omega)$ umgewandelt und mit der Auswertefunktion $W(\Omega)$ multipliziert. Das resultierende Spektrum wird nun in insgesamt 9 Oktaven unterteilt, und in den Ortsraum zurücktransformiert (IFT). Das Bewertete Längsprofil h_w(x) berechnet sich aus der Summe der neun oktavbandgefilterten, gewichteten Teilprofile h_{w,i}(x). Zur Beschreibung des WLP werden zwei Indikatoren abgeleitet: die Standardabweichung (SBL) und die die Differenz zwischen Maximum und Minimum (DBL) in einem Auswerteabschnitt bestimmter Länge. Als Auswerteabschnittslängen werden für Bundesfernstraßen 100 m und für Innerortsbereiche sowie Abnahmeverfahren 20m vorgeschlagen. Hinsichtlich der Interpretation der Indikatoren kann verallgemeinernd festgestellt werden, dass eine Spitze im DBL-Signal eher ein Hinweis auf ein geometrisches Einzelereignis ist. Eine Spitze SBL-Signal hingegen deutet auf eine dynamisch-periodische Unebenheit im Belag hin.



Abbildung 5-108: Berechnungsschema für das Bewertete Längsprofil [Ueckermann et al. 2008].

5.1.6.2.3 International Roughness Index

Auch wenn er in Deutschland kaum gebräuchlich ist, wurde vereinzelt ergänzend auch der International Roughness Index (IRI) berechnet. Dabei handelt es sich um einen weltweit anerkannten, standardisierten Indikator zur Bewertung der Längsebenheit einer Straßenoberfläche [Nikolaides 2014]. Er fasst jene Eigenschaften der Fahrbahnoberflächenabweichungen zusammenzufassen, die sich auf die Bewegung der Fahrzeugaufhängung auswirken. IRI-Werte lassen daher Rückschlüsse auf die von den Fahrgästen auf den Rücksitzen erlebten ebenheitsbezogenen Fahrkomfort zu, da sie stark mit der vertikalen Fahrgastbeschleunigung korrelieren. Mit Hilfe eines mathematischen Modells wird die gesamte vertikale Bewegung des Feder-Dämpfer-Systems eines Fahrzeuges während der Fahrt über den Fahrbahnbelag berechnet (siehe Abbildung 5-109). Die IRI Berechnung basiert darauf, dass die kumulierte Aufhängungsbewegung eines Standardfahrzeugs zur zurückgelegten Strecke ins Verhältnis gesetzt wird (z. B. m/km oder mm/m).



Computer Algorithm



5.1.6.3 Untersuchte Baustellen

Die Arbeiten von L+P im Arbeitsschwerpunkt A zielten darauf ab, die Ebenheit der Fahrbahnoberfläche bei heutiger Herstellung von Betonfahrbahnen anhand von verschiedenen, durch die Verbundpartner ausgewählten, Baumaßnahmen zu analysieren. Den Kern bilden hier Analysen der Längsebenheit entlang der Indikatoren PGR_MAX (Planographensimulation) sowie DBL und SBL (Bewertetes Längsprofil). Die Ebenheitsindikatoren sind immer auf ihren Zielwert normiert in den Graphen dargestellt. Somit zeigt ein Wert über 1 eine Überschreitung des Zielwertes an und alle Indikatoren können in einem gemeinsamen Graphen dargestellt werden. Als Zielwerte wurden eingesetzt:

- PGR_MAX: 4mm
- SBL: 4mm
- DBL: 24 mm

Nachfolgend sind alle betreffenden Messungen beschrieben. Nicht immer war es aus logistischen Gründen möglich, Tragschicht und Decke dreidimensional zu vermessen. Wo dies jedoch möglich war, wird im Text auf das Kapitel verwiesen, dass sich nominell mit der Erstellung von 3D Modellen der ungebundenen Fahrbahn befasst.

5.1.6.3.1 A61 Dieblich (I)

Die erste Autobahnbaustelle, die mit einem I.R.I.S System im Rahmen des Projektes vermessen wurde, befand sich auf der BAB A61 zwischen der Anschlussstelle Koblenz/Dieblich und der Raststätte Mosel-Ost in Richtung Ludwigshafen (Station 234+430 bis zur Station 237+250). Am 25. September wurden die Messungen der Tragschicht durchgeführt (Details hierzu in Kapitel B3.1 - Erstellung 3-D-Modell der Fahrbahn), am 04. und 05. Dezember 2017 folgten die Messungen der Deckschicht. Dabei wurden jeweils der rechte Fahrstreifen (FS1) und der Standstreifen (FSO) erfasst, welche beide in Betonbauweise auf Asphalttragschicht errichtet wurden. Während für den FS1 ca. 3.5 km Strecke aufgenommen werden konnten, war dies für den FS0 nur für ca. 1 km Strecke möglich. Die Umstände der Messung stellten sich grundsätzlich als problematisch heraus: Während der Befahrungen befanden sich vielerorts noch Baumaterialien, Baufahrzeuge, temporäre Rampen zwischen dem linken und rechten Fahrstreifen und Baustellenpersonal auf der Messstrecke. Diese mussten mitunter durch harsche Ausweichmanöver umfahren werden. Ein Verlassen der durch den Fahrstreifen vorgegeben Fahrlinie ist jedoch für die Ableitung relativer Höhenlängsprofile problematisch. Bereits der Wechsel auf einen anderen Fahrstreifen bei stets vorhandener Querneigung führt zu Abweichungen in der absoluten Höhe und somit zu Verfälschungen der Ebenheitsanalyseergebnisse. Ferner waren die Fahrbahnoberflächen sowohl bei der Messung der Tragschicht als auch bei der Messung der Decke nicht frei von Verschmutzungen, Laub oder Baumaterial. Erschwerend hinzu kommt für die Deckenmessung, dass sie jahreszeitlich bedingt regennass und stellenweise mit Schnee überzogen.



Abbildung 5-110: Situation zum Zeitpunkt der Messung auf der A61 am 4./5.12.2017. Die Messergebnisse mussten leider verworfen und die Messungen 2018 wiederholt werden.

So musste die Messung vom 04.12.2017 vollständig verworfen und am 05.12.2017 wiederholt werden (vgl. Abbildung 5-110). Wasser bzw. Schnee auf der zu messenden Oberfläche oder Verschmutzungen wie Laub sind im Allgemeinen problematisch für die LiDAR-basierte Messung hochpräziser Oberflächenmodelle. Während Schnee und Wasser den im nahen Infrarotbereich messenden Laser absorbieren, kann Laub beim Überfahren unter Umständen aufgewirbelt und vom Laserscanner als erhöhtes Hindernis auf der Fahrbahn erfasst

werden. Nur mit erheblichem manuellem Aufwand lassen sich diese Bereiche von solchen Störfaktoren bereinigen. Laserscanner-basierte Oberflächenmessungen bzw. berührungslose Ebenheitsmessungen erfordern trockene und saubere Oberflächen. Die Messungen sollten möglichst kontinuierlich erfolgen. Dies wurde seitens L+P wiederholt im Rahmen der Arbeitsgruppentreffen angesprochen und darum gebeten, im Rahmen der durch den Baustellenbetrieb vorgegebenen Möglichkeiten zum Zeitpunkt der Ebenheitsmessungen für eine saubere und freie Messstrecke zu sorgen, sowie die Messtermine möglichst für potenziell trockene Monate zu planen.



Abbildung 5-111: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Dieblich-Boppard BAB A61 Teil II (Messung vom 07.08.2018)

Am 07.08.2018 konnte die Messung der Betondecke bei trockenen Oberflächenverhältnissen wiederholt werden. Für die Ebenheitsanalyse wurden als Indikatoren der PGR_MAX (Planographensimulation) sowie die beiden Indikatoren es bewerteten Längsprofils DBL (WLP-delta) und SBL (WLP-sigma) verwendet. Die Ergebnisse im Hauptfahrstreifen sind vor allem im Bereich zwischen Messmeter 0 und 500 sowie im Bereich zwischen Messmeter 1000 und 1800 auffällig (siehe Abbildung 5-111). Generell ist die Unebenheit auf dem Standstreifen gravierender, als auf dem Hauptfahrstreifen. Auf dem Hauptfahrstreifen ist der Bereich ab Messmeter 1800 durch mehrheitlich durch eine gute Ebenheit charakterisiert.

Die Unebenheiten im Bereich bis Messmeter 500 waren auf Fräsarbeiten an der Asphaltdeckschicht am Übergang von FS 1 zu FS 2 zurückzuführen. Offenbar wurde beim Einbau durch die Abtastung bzw. Führung des Fertigers eine Unebenheit in Längsrichtung in die Betondecke des FS 1 eingebaut. Diese ist in der Analyse der spektralen Leistungsdichte (PSD-Analyse) deutlich zu erkennen. Abbildung 5-112 zeigt einen signifikanten Ausschlag bei einer Wellenlänge von ca. 1 Meter für die rechte und linke Rollspur des FS 1. Entsprechende Unebenheiten konnten auf dem Seitenstreifen nicht detektiert werden.



Kein Peak bei ca. 1 m Wellenlänge im FSO (links & rechts)



Abbildung 5-112: Wellenbildung aufgrund einer fehlerhaften Feinfräsung. Das Foto oben zeigt den betroffenen Bereich. Die Wellenbildung ist bei Nässe besonders gut zu sehen. Unten ist die PSD-Analyse für die rechte und linke Rollspur des Fahrstreifens 0 und 1 dargestellt. Das Niveau der Kurven für den Standstreifen (grün und pink) ist insgesamt höher als das Niveau der Kurven für den Hauptfahrstreifen (rot und blau), was sich auch in der schlechteren Bewertung des FSO durch die Ebenheitsindikatoren widerspiegelt. Dafür ist ein deutlicher Peak bei einer Wellenlänge von 1 – 1.3 m in der PSD-Analyse für die Rollspuren des Hauptfahrstreifens zu erkennen. Dies ist auf die Wellenbildung infolge der fehlerhaften Feinfräsung in den ersten 500 Metern der Baustelle zurückzuführen.

Am Ende der Baustelle bei ca. Messmeter 2700 befindet sich ein auffälliger Peak, der in beiden Fahrstreifen vorhanden, aber im Hauptfahrstreifen wesentlich deutlicher ausgeprägt ist. Hier wurde eine Plattenentnahme mit anschließendem Handeinbau durchgeführt. Aufgrund der Auffälligkeit im Ebenheitssignal wurden hier eine weiterführende 3D-Analyse durchgeführt. Hierzu wurde analog zur bei [Wieland et al. 2018] beschriebenen Vorgehensweise in einen 3D-Puntkwolkenabschnitt eine ideale Oberfläche eingepasst und anschließend die 3D-Abstände jedes Messpunktes zur idealen Oberfläche berechnet. In der Folge sind die 3D-Messpunkte mit dem entsprechenden Vertikalabstand farblich kodiert, der als eine Oberflächendeformation im Sinne einer Abweichung von der Idealform interpretiert werden kann. Die in Abbildung 5-113 dargestellte Querscheinfuge zeigt deutlich eine ausgeprägte Unebenheit im Bereich der rechten Rollspur.



Abbildung 5-113: 3D-Analyse der Vertikaldeformation im Bereich des Hauptfahrstreifens bei Messmeter 2700. Links ist eine 3D-Punktwolke von 12m Länge und ca. 4.2m Breite in perspektivischer Ansicht entsprechend ihrer Reflexionsintensitätswerte in Graustufen dargestellt. Der rechts dargestellten Buckel (rot) entlang der Querscheinfuge führt zu einer relativen Höhendifferenz von ca. 1 cm auf weniger als 1 m Länge. In der linken Rollspur ist die Deformation weniger stark ausgeprägt.

5.1.6.3.2 A61 Dieblich (II)

Der zweite Bauabschnitt befand sich auf der BAB A61 zwischen der der Raststätte Mosel-Ost und der Anschlussstelle Koblenz/Waldesch in Richtung Ludwigshafen (Station 237+250 bis zur Station 241+000). Bereits am 14.12.2018 wurde der Bereich der Baustelle Dieblich II nach Fertigstellung der Decke mit dem Messsystem S.T.I.E.R gemessen. Eine Messung der Tragschicht war aus technisch-logistischen Gründen nicht möglich.



Abbildung 5-114: Brückenbauwerk im Bereich der Anschlussstelle Koblenz/Waldesch bei Messmeter 2450m.

Analysiert wurden auf ca. 3.7 km Länge der Stand- und der Hauptfahrstreifen. Der Baustellenbereich wird durch ein kurzes Brückenbauwerk von ca. 50 m Länge in zwei Teile geteilt (siehe Abbildung 5-114). Die Ebenheitsindikatoren nach dem Brückenbauwerk legen eine im Vergleich zu den ersten ca. 2.4 km leicht bessere Ebenheit nahe.

Während der Indikator PGR-Max für den Hauptfahrstreifen nur sporadisch den 1,5-Wert überschreitet und somit im Allgemeinen eine gute Längsebenheit anzeigt, bewerten die Indikatoren DBL und SBL die Längsebenheit schlechter.

Aufgrund der häufigen Überschreitungen des 1,5-Wertes würde die Strecke den Anforderungen des bewerteten Längsprofils im Rahmen einer Bauabnahme in weiten Bereichen nicht genügen.



Abbildung 5-115: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Dieblich-Boppard BAB A61 Teil II (Messung vom 14.12.2018)

An einigen Bereichen, die in der Ebenheitsanalyse auffielen, wurden weiterführende 3D-Analysen durchgeführt. Hierzu wurde analog zur bei [Wieland et al. 2018] beschriebenen Vorgehensweise in einen 3D-Puntkwolkenabschnitt eine ideale Oberfläche eingepasst und anschließend die 3D-Abstände jedes Messpunktes zur idealen Oberfläche berechnet. In der Folge sind die 3D-Messpunkte mit dem entsprechenden Vertikalabstand farblich kodiert, der als eine Oberflächendeformation im Sinne einer Abweichung von der Idealform interpretiert werden kann (siehe Abbildung 5-116).



 Abbildung 5-116: 3D-Analyse der Vertikaldeformation im Bereich des Hauptfahrstreifens exakt auf Höhe der Tankstelle Mosel-West. Links ist eine 3D-Punktwolke von 10m Länge und ca. 4.2m Breite in perspektivischer Ansicht entsprechend ihrer Reflexionsintensitätswerte in Graustufen dargestellt. Die rechts dargestellten Buckel und Senken führen vor allem in der linken Rollspur zu einer relativen Höhendifferenz von ca.
1.5 cm auf weniger als 2 m Länge. In der rechten Rollspur ist die Deformation weniger stark ausgeprägt. Dennoch erklären sich hierdurch die Peaks der Indikatoren DBL und SBL bei Messmeter 350 m in Fahrstreifen 1 (siehe Abbildung 5-116). Dieselbe Stelle ist auch im Fahrstreifen 0 auffällig.

5.1.6.3.3 Flughafen Köln-Wahn

Im Zeitraum von Juni bis Juli 2018 wurde das Flugvorfeld des Flughafens Köln-Wahn erneuert und im Rahmen des Verbundprojektes als Analyse-Baustelle untersucht.



Abbildung 5-117: Übersicht über die Lage der Baustelle (links: blau). In der rechten Teilabbildung sind die Messlinien (Trajektorien) des Messfahrzeuges im Zuge der Tragschicht- und der Deckenmessung dargestellt.

Die Befahrung der Tragschicht fand am 11.06.2018 mit dem Messfahrzeug S.T.I.E.R statt. Aufgrund der Baustellensituation war nur ein Teilbereich (ca. 40 - 50%) des eigentlichen Messgebietes für das Messfahrzeug zugänglich (siehe Abbildung 5-117). Dieser Bereich ist in der Karte in Abbildung 5-117markiert. Da die Messungen später einzelnen Fertigerbahnen zugeordnet werden sollten, diese aber nicht auf der Tragschichtober-fläche markiert waren, wurde im Vorfeld der Messung ein digitales Navigationsnetz für den Messfahrzeugführer auf Basis eines georeferenzierten Bauausführungsplans erstellt.



Abbildung 5-118: Situation zum Zeitpunkt der Tragschichtmessung. Baumaterialien und ein Graben quer über das zu messende Areal verhinderten eine vollständige Erfassung der Unterlage.



Abbildung 5-119: Bereich, für den 3D-Daten der Tragschichtoberfläche aufgenommen werden konnten. Aufgrund eines Grabens konnte das Messfahrzeug die restlichen Baustellenbereiche nicht befahren.



Abbildung 5-120: Überblick über die seitens L+P definierten Analysebereiche, innerhalb derer die bahnweisen Ebenheitsmessungen gemittelt wurden. Die Pfeile geben die Befahrungsrichtung an.

Am 19.09.2018 erfolgte die Befahrung der Decke. Diese konnte ohne Behinderungen durchgeführt werden. Die Deckenmessung wurde so realisiert, dass die Trajektorien möglichst den bereits erfassten Messlinien aus der Tragschichtmessung und somit einzelnen Fertigerbahnen entsprachen (siehe *Abbildung 5-120* rechts). Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Navigationssoftware im Fahrzeug nur mit Realtime-GNSS-Genauigkeit die gefahrene Route abgleicht. Insofern waren geringfügige laterale Abweichungen zwischen den Messlinien der Tragschicht- und Deckenmessung zu erwarten.



Abbildung 5-121: Ergebnis der Ebenheitsanalyse der auf dem Flughafen eingebauten Betondecke (Messung vom 19.09.2018.) Alle Indikatoren wurden innerhalb der Auswerteblöcke gemittelt.

In einem ersten Analyseschritt wurden die Ebenheitsindikatoren PGR_MAX, DBL und SBL berechnet. Aufgrund der generell geringen Länge der einzelnen Fertigerbahnen und der Notwendigkeit von rechtzeitigen Rangierbewegungen am Ende der jeweiligen Fertigerbahn, sind nur recht kurze Bereiche von wenigen zehner Metern innerhalb der Trajektorien wirklich verwertbar. Zusätzlich beeinflusst die quer durch das Messfeld verlaufende Schlitzrinne die Messergebnisse. Aus den Kurven der Ebenheitsindikatoren, die in Abbildung 5-121 gezeigt sind, kann eine gute, wenn auch keine sehr gute Ebenheit festgestellt werden. Für diese Darstellung wurden
die Indikatoren der einzelnen, Fertigerbahn-weisen Messungen innerhalb von Blöcken gleicher Messlänge gemittelt (sieheAbbildung 5-122).

Die in Abbildung 5-123erkennbaren Peaks in den Graphen bei Messmeter 80, 50 und 20 (von oben nach unten) sind auf die querende Schlitzrinne sowie die mehrere Zentimeter breiten Fugen in deren Umfeld zurückzuführen. Der Anstieg der Indikatoren jeweils am Ende der Messungen ist nicht baulich bedingt, sondern ist auf das Verlassen der Messlinie im Zuge des Rangierens/Umlenkens zurückzuführen (siehe Abbildung 5-121).

Im Rahmen der Untersuchungen am Flughafen Köln-Wahn sollten neben der reinen Ebenheitsanalyse auch weitere Fragestellungen adressiert werden. So sollte anhand dieser Baustelle ein erster Versuch unternommen werden, die Schichtdicke aus multitemporalen Laserscans zu berechnen. Die Bestimmung der Schichtdicke erfolgt typischerweise punktuell und stichprobenartig mit klassischen Methoden durch den Vergleich von Soll- und Ist-Schichtdicke, entweder durch Entnahme von Bohrkernen oder zerstörungsfrei durch Einbringen von Kontrollkörpern zwischen Tragschicht und Betonschicht. Aussagen über räumliche Muster sind mit diesen Methoden nicht möglich. Dazu ist eine flächenhafte Analyse sowohl der Tragschicht als auch der Betonoberfläche erforderlich. Leider konnten, wie bereits angesprochen, keine flächendeckenden 3D-Daten für Tragschicht und Decke erfasst werden, weshalb der Datenstand der Tragschichtmessung die letztendliche Ausdehnung der Schichtdickenmodellierung determiniert.

Aus den 3D-Oberflächenmodellen der Tragschicht- und der Deckenmessung wurde eine Dreiecksvermaschung (TIN) berechnet und dann in einem 1m-Raster die Vertikaldifferenz zwischen beiden Oberflächen berechnet. Das entstandene Modell misst ca. 160 m * 90 m. Die südliche Hälfte des Gesamtmodells ist in Abbildung 5-122 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit dieser Methode die Einbaustärke des Betons prinzipiell flächig und kontinuierlich approximiert werden kann. Das berechnete Schichtdickenmodell hat eine mittlere Einbaustärke von ca. 37 cm bei einer Standardabweichung von ca. 2 cm. Die SOLL-Einbaustärke betrug bei dieser Baumaßnahme 38 cm, wobei seitens Schnorpfeil stärker eingebaut wurde. Über das gesamte Feld verteilt vorliegende Bohrkern-Informationen der Firma Schnorpfeil belegen eine mittlere Einbaustärke von 40.4 cm. An zehn verglichenen Bohrkernen betrug die Abweichung der modellierten Schichtdicke im Mittel 4 cm (+/- 2 cm), wie aus Abbildung 5-122 hervorgeht. Der Grund für die abweichenden Ergebnisse der Schichtdickenmodellierung ist, dass der Fehlereinfluss durch die absolute Höhengenauigkeit, die vom Positionierungssystem determiniert wird, nicht durch Passpunkte o. ä. kompensiert wurde. Dies ist bei der Interpretation des Schichtdickenmodells unbedingt zu beachten. Die Positionierungsgenauigkeit beträgt für die Northing-Komponente und Easting-Komponente ca. 1 - 2 cm (RMSE) und für die Height-Komponente ca. 4 - 5 cm (RMSE) sowohl bei der Messung der Unterlage als auch bei der Messung der Decke. Für eine bewegliche Plattform und ohne externe Korrekturdaten ist dies zwar eine gute Positionierungslösung, jedoch für eine zweifelsfreie Interpretation der approximierten Schichtdickenwerte ist die Standardabweichung der Höhenkomponente der Positionierungslösung zu ungenau.



Abbildung 5-122: Die Grafik zeigt die approximierten Schichtdicken als farbkodierte Heatmap in einem Geoinformationssystem. Die Zellauflösung des Modells beträgt 1m*1m. Von der Firma Schnorpfeil entnommene Bohrkerne sind als weiße Punkte dargestellt. An jedem Bohrkern steht die entsprechende ID und die Abweichung zwischen der mittels Beprobung gemessenen und der im Modell approximierten Schichtdicke. Ein delta-Wert von 4 cm bedeutet hierbei, dass die Modellierung eine 4 cm zu geringe Schichtdicke angibt.

Eine letzte Frage, die mithilfe der mobilen Lasermessungen an der Analyse-Baustelle Köln-Wahn untersucht werden sollte, ist die nach einer möglichen Korrelation der Ebenheiten von Unterlage und Decke. Auch wenn die Messlinien (Trajektorien) der Tragschicht- und der Deckenmessung sich nicht 1:1 in ihrem Verlauf entsprechen (laterale Abweichungen im unteren Dezimeterbereich), so war es trotzdem möglich, die Messlinien einander zuzuordnen und die Frage zu untersuchen, ob etwaige Unebenheiten der Tragschicht direkten Einfluss auf die Ebenheit der Betondecke haben. Im Folgenden sind exemplarisch die Höhenlängsprofile zweier Messungen gegenübergestellt, siehe Abbildung 5-123. Während die Unterlage durch diverse Unebenheiten charakterisiert ist, sind in der Betondecke keine Peaks im Oberflächenprofil mehr zu erkennen.





Im Ergebnis dieses Arbeitspaketes wurden die seitens L+P mehrere Betondecken realer Baumaßnahmen aufgenommen und hinsichtlich ihrer Längsebenheit entlang verschiedener Indikatoren analysiert und neue Analyseansätze erprobt. Der Grad der Zielerreichung ist somit als vollständig erreicht zu bewerten.

5.1.6.3.4 Untersuchungsstrecke Wittlich (I)

Die nächste Analysebaustelle des Verbundprojektes befand sich auf der BAB A1 zwischen dem Autobahnkreuz Wittlich und Anschlussstelle Salmtal in Richtung Trier (Station 116+000 bis 111+900). Alle zwei Fahrstreifen sowie der Standstreifen sind in Betonplattenbauweise ausgeführt.

Die am 13.12.2018 mit dem Messfahrzeug S.T.I.E.R gemessene Strecke von ca. 4,7 km Länge startet etwa bei Kilometer 110+950 und endet bei Kilometer 115+750. Im Allgemeinen ist bei allen drei untersuchten Fahrstreifen ein ähnlicher Kurvenverlauf der Ebenheitsindikatoren festzustellen. Die Peaks im Umfeld von Messmeter 1300 und 2700 fallen mit dem Auftreten von Brückenübergangskonstruktionen zusammen (Brücke über die Mosel-Bahnstrecke und Brücke über die L50).

Nach Auskunft der bauausführenden Firma Heinz Schnorpfeil GmbH, war die Strecke zwar in der Planographenmessung unauffällig, jedoch ist beim Befahren per Pkw bereichsweise ein subjektiv als vermindert eingeschätzter Fahrkomfort festzustellen. Dies spiegelt sich in der Ebenheitsanalyse dahingehend wider, als dass die Indikatoren DBL und SBL leicht über ihrem Zielwert-Niveau liegen, wohingegen der PGR-Max Indikator weitgehend unterhalb des Zielwert-Niveaus bleibt (siehe Abbildung 5-124).

Ergänzend wurde eine Fahrkomfortanalyse auf Basis des für die Ebenheitsauswertungen in den USA maßgeblichen International Roughness Index (IRI) durchgeführt. Als Zielwert für neue Betonfahrbahnen werden IRI Werte von 1.13 m/km vorgeschlagen [AASHTO 2010], [David et al. 2015]. Das Analyseintervall beträgt gemäß amerikanischen Standards 160.93 m. Abbildung 5-125 zeigt einen Anstieg der IRI-Kurve bis hin zum ersten Überführungsbauwerk über die Mosel-Bahnstrecke.



Abbildung 5-124: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Wittlich-Salmtal BAB A1 Teil I (Messung vom 13.12.2018)



Abbildung 5-125: Fahrkomfortanalyse auf Basis der International Roughness Index (IRI) für die drei untersuchten Fahrstreifen (Messung vom 13.12.2018).

Abschließend wurden an auffälligen Bereichen in das 3D-Modell der Betonoberfläche auf 50 m Länge quadratische Trendoberflächen eingepasst und dann die Abweichung zwischen Laserscan und idealisierter Oberfläche berechnet. Das Ergebnis kann als eine 3D-Deformationsanalyse interpretiert werden bei der negative Werte Senken und positive Werte Buckeln entsprechen. Wie in Abbildung 5-126 und Abbildung 5-127 dargestellt, können somit die in der Decke enthaltenen Längsunebenheiten dreidimensional quantifiziert und visualisiert werden.



Abbildung 5-126: Dargestellt ist links eine nach der Reflexionsintensität in Graustufen eingefärbte 3D-Punktwolke der Betondecke. Rechts ist die Vertikalabweichung zu einer in die 3D-Oberfläche eingepassten Trendoberfläche. Im hinteren Bereich der perspektivischen Ansicht auf das 3D-Modell, welches etwa an Messmeter 950 liegt, ist eine Längswelle von ca. 20 m Länge erkennbar, die sich im Schwanken in Längsrichtung zwischen den Farben Rot über Grün zu Blau und wieder zurück äußert (ca. 2 cm Höhenschwankung auf ca. 10m Länge).

Mutmaßliche Ursache für die periodischen Unebenheiten der gefertigten Betondecke ist ein ungünstig gewählter Abstand der Absteckung für die Drahtanlage. Ein in wiederkehrenden Intervallen durchhängender Führungsdraht, könnte dafür verantwortlich sein, dass Längswellen in die Decke eingebaut wurden, die eine Wellenlänge aufweisen, die nicht vom Planographen, wohl aber von den fortschrittlichen Ebenheitsindikatoren erkannt werden können.



Abbildung 5-127: Dargestellt ist links eine nach der Reflexionsintensität in Graustufen eingefärbte 3D-Punktwolke der Betondecke. Rechts ist die Vertikalabweichung zu einer in die 3D-Oberfläche eingepassten Trendoberfläche. Im hinteren Bereich der perspektivischen Ansicht auf das 3D-Modell, welches etwa an Messmeter 1550 liegt, ist eine Längswelle von ca. 10 m Länge erkennbar, die sich im Schwanken/Schwingen in Längsrichtung zwischen den Farben Rot über Grün zu Blau und wieder zurück äußert (ca. 1cm Höhenschwankung auf ca. 10m Länge).

5.1.6.3.5 Untersuchungsstrecke A1 Wittlich (II)

In der Gegenrichtung befand sich auf der BAB A1 zwischen Anschlussstelle Salmtal und Autobahnkreuz Wittlich in Richtung Wittlich (Station 116+000 bis 109+000) ebenfalls eine Baustelle, die im Projektkontext analysiert wurde.

Die 3D-Vermessung wurde für die Tragschicht am 17.09.2019 und für die Betondecke am 12.12.2019 jeweils mit dem Messfahrzeug I.R.I.S 13 durchgeführt. Die zu messende Strecke war ca. 6.5 km lang und zwischen Kilometer 116+000 und 109+500 gelegen. Die Auswertung betraf die beiden Fahr- sowie den Standstreifen. Das Höhenmodell der Tragschicht wurde aufgenommen, aber in Abstimmung mit den Projektpartnern nicht explizit hinsichtlich ihrer Ebenheit analysiert. Die Tragschichtmessungen waren insbesondere für die experimentelle Untersuchung zur Approximation der Einbaustärke relevant, welche bei [Skalecki et al. 2021] detailliert beschrieben ist.



Abbildung 5-128: Regennasse Fahrbahn während der Messung am 12.12.2019.

Die Ebenheitsanalyse der Betondecke ist aufgrund der während der Messung vorherrschenden Oberflächennässe nur eingeschränkt aussagekräftig (siehe Abbildung 5-128). Der Grund hierfür ist, dass ungünstige oder gar mehrfache Reflexionen des Lasers bei einem vorhandenen Wasserfilm auf dem Scanobjekt zu einer weniger sicheren Abbildung der tatsächlichen Oberfläche führen. Durch die Wiederholungsmessung des Hauptfahrstreifens einmal bei moderater Feuchtigkeit und einmal bei starker Feuchtigkeit, stellte sich heraus, dass die Streuung auf der gemessenen Oberfläche bei der feuchteren Situation um den Faktor 2.7 stärker ausgeprägt ist, als bei der weniger feuchten Situation. Dies beeinflusst entsprechend auch die Ebenheitsindikatoren. Vor allem bei der Messung des zweiten Fahrstreifens scheint die unterschiedlich abgetrocknete Oberfläche über die Messstrecke einen Einfluss auf die Messergebnisse zu haben: Der dort ersichtliche Trend, dass die Indikatoren ab dem zweiten Messkilometer zum Ende der Messstrecke hin ansteigen, kann aufgrund der dort stärkeren Fahrbahnnässe nicht zweifelsfrei auf eine tatsächlich unebener werdende Fahrbahnoberfläche zurückgeführt werden.

Für den Hauptfahr- und Standstreifen deuten die Indikatoren im Allgemeinen auf eine gute Ebenheit hin (siehe Abbildung 5-129). Nur vereinzelt treten Peaks in den Signalen auf, die an drei Stellen durch Übergangskonstruktionen an Brückenbauwerken zu erklären sind. Die restlichen lokal begrenzten, aber mitunter sehr starken Überschreitungen des 1,5-Wertes verweisen auf tatsächlich vorhandene Unebenheiten der Fahrbahn, zumal sie auf jedem Fahrstreifen (wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägt) an derselben internen Stationierung auftreten.

Eine detaillierte Analyse eines bei Messmeter 3000 beginnenden, ca. 1.5 km langen Teilbereiches dieser Baustelle fand im Zuge einer wissenschaftlichen Publikation statt [Skalecki et al. 2021]. In diesem Bereich herrschte eine weitgehend abgetrocknete Oberfläche vor.



Abbildung 5-129: Ergebnis der Ebenheitsanalyse für die drei untersuchten Fahrstreifen der Baustelle zwischen Salmtal und Wittlich auf der BAB A1 (Messung vom 12.12.2019). Aufgrund der vorherrschenden Oberflächenfeuchte sind Aussagen zur Ebenheit nicht für den gesamten Auswertebereich möglich.

Neben der Analyse der Längsebenheit, lag der Fokus bei der Analyse dieser Baustelle darauf, die Approximation der Betoneinbaustärke aus Laserscandaten unter Berücksichtigung der Erkenntnisse, die aus den vorherigen Messungen gewonnen werden konnten, zu realisieren. Eine wesentliche Erkenntnis war, dass die globale Höhengenauigkeit des Positionierungssystems nicht ausreichend genau ist, um gesicherte Aussagen zur absoluten Einbaustärke zu treffen. Daher wurden im Rahmen der Baustellenanalyse auf der BAB A1 Referenzobjekte im Seitenraum der Baustelle angebracht, die als relative Verknüpfungspunkte für multitemporale Laserscans dienen sollten. Dabei handelte es sich um grau lackierte Boxen mit einer Größe von 0,45 × 0,45 × 0,45 m, die an ortsfesten Objekten, wie z. B. Schilderbrückenpfeilern, angebracht wurden, sodass sie sowohl im Zuge der Tragschicht- als auch der Deckenmessung sichtbar waren. Da sich die Referenzboxen außerhalb des Sichtfeldes des Oberflächen-Laserscanners PPS befanden, wurde zu deren Erfassung und zur räumlichen Synchronisation der Tragschicht- und Deckendaten der Umfeldlaserscanner CPS eingesetzt. Abbildung 5-130 zeigt im linken Teil exemplarisch Ausschnitte von CPS Laserscans vor und nach Einbau der Betondecke. In der rechten Teilabbildung sind die beiden Scans räumlich synchronisiert im Querprofil dargestellt. Nachdem die Synchronisierung der Datenströme auf Grundlage der in beiden Messungen sichtbaren Referenzbox erfolgte, konnte entlang der Z-Achse der Abstand zwischen den 3D-Punkten der Tragschicht- und der Deckenoberfläche berechnet und dieser als Approximation der Einbaustärke interpretiert werden. In [Sakelcki et al. 2021] sind die Analyseschritte im Detail beschrieben.



Abbildung 5-130: Prinzip der Differenzbildung von Unterlage-Scan und Decke-Scan zur Approximation der Einbaustärke ΔZ. Die beiden linken Abbildungen zeigen den Bereich des Scans um die Referenz-Box in einer Schrägansicht im Tragschicht-Scan (oben) und im Decken-Scan (unten).

Abbildung 5-131 zeigt das Ergebnis für das auf Basis der multitemporalen Laserscans berechnete Schichtdickenmodell. Es deckt die gesamte Fahrbahnbreite von ca. 11 m auf einer Länge von ca. 100 m ab. Die auf den Laserscans basierende Modellierung wurde durch einige konventionelle Dickenmessungen validiert. Auf der Grundlage von Stahlronden, die vor dem Einbau auf der Oberfläche der Tragschicht platziert wurden, konnte zerstörungsfrei an zwei Stellen mittels Impulsinduktionsmessungen (PI) eine hochgenaue Schichtdickenbestimmung am Anfang und am Ende des Untersuchungsgebietes durchgeführt werden (Punkte A und B in Abbildung 5-131). Darüber hinaus wurde ein Bohrkern extrahiert, um zusätzliche Informationen über die Straßeneigenschaften und die Dicke zu erhalten (Punkt C in Abbildung 5-131). Alle konventionell-punktuellen Messungen wurden von der Fa. Schnorpfeil durchgeführt.



Abbildung 5-131: Karte der farblich kodierten relativen Schichtdicke in Bezug auf die Soll-Einbaustärke von 27 cm. Ergänzend ist die Lage der Prüfpunkte A, B und C sowie der Referenzbox eingetragen. Im Hintergrund sind die Plattengrenzen und Straßenmarkierungen leicht durchscheinend dargestellt.

Der Vergleich mit punktuellen PI-Messungen und die Auswertung des Bohrkerns belegen die Plausibilität der aus den mobilen Laserscans abgeleiteten Werte. Am Punkt C zeigt der Bohrkern eine 3 mm dickere absolute Schichtdicke an, als mit dem Laserscan rekonstruiert wurde. Die Punkte A und B weisen eine Abweichung von 20 und -8 mm auf. Ihre Position wurde seitens Fa. Schnorpfeil nur händisch in einen Plan eingezeichnet und kann, im Gegensatz zur Bohrkernentnahmestelle, in den Laserscan-Daten nur grob lokalisiert werden. Der vorgestellte Ansatz kann die klassischen Ansätze zur Bestimmung der absoluten Fahrbahndicke nicht ersetzen, aber er ermöglicht es, die räumliche Ausprägung von Diskontinuitäten zu identifizieren und kann somit Hinweise darauf geben, wo Bereiche mit einer potentiell von der Planung abweichenden und ggf. kritischen Betondicke liegen könnten. Mit dieser Information könnten Bohrkerne gezielt entnommen und die Schichtdicke an diesen Stellen absolute verifiziert werden.

5.1.7 A1.7 - Zusammenführung und Dokumentation aller Beobachtungen, Feststellungen und Messdaten zur weiteren Analyse und Bewertung der komplexen Prozesskette "Herstellung von Betonfahrbahnen"

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen Beobachtungen und Erkenntnisse zusammengeführt und über den gesamten Baustellenprozess hinweg betrachtet. Dies stellt einen zentralen Punkt dar, da in vielen Bereichen eine einheitliche Datenerfassung und insbesondere eine übergeordnete Datenverarbeitung und Aufbereitung fehlt. Durch einen gesamtheitlichen Ansatz kann jedoch nicht nur die Qualität der einzelnen Prozessschritte, wie er heutzutage schon teilweise stattfindet, sondern der gesamte Einbauprozess verbessert werden. Dies ist insbesondere relevant, da die letztendliche Beton- und Fahrbahnqualität nicht nur von den einzelnen Prozessschritten, sondern von deren gesamten Zusammenspiel abhängt. So kann eine Betonmischung noch so gut sein, wenn diese jedoch erst zu einem viel späteren Zeitpunkt als erwartet an der Baustelle ankommt. In dieser Zeit kann der Beton bereits seine Eigenschaften signifikant verändert haben, z.B. da er zu sehr angesteift und damit schlecht verarbeitbar ist. Auf der anderen Seite ist es sinnvoll, dass an den Fertiger Informationen zur aktuellen Ausstoßmenge und zu den Eigenschaften des Betons, wie er in der Mischanlage dem Fahrzeug übergeben wird sowie die zu erwartende Anlieferzeit übermittelt werden, um ggf. die Einbaugeschwindigkeit anzupassen und Stillstandszeiten zu vermeiden.

Die Ergebnisse der einzelnen Teilprozesse erfolgte dabei bereits in den vorigen Kapiteln und wird nicht noch einmal aufgeführt. Vielmehr wird auf die Datenaufbereitung und Vorbereitungen für AP C (Digitale Vernetzung) eingegangen.

5.1.7.1 Anforderungen zur Synchronisation

Um eine gesamtheitliche Betrachtung zu ermöglichen sind, bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Ein zentraler Aspekt stellt dabei die Synchronisation und Abstimmung der aufgezeichneten Messdaten an den einzelnen Stationen dar. Erst wenn diese realisiert werden kann, lassen sich die Daten sinnvoll austauschen sowie weitere Analysen durchgeführen. In diesem Zusammenhang wurden anhand der Baustellen Köln-Wahn und Wittlich erste Messreihen durchgeführt. Die folgende Analyse geht dabei vor allem auf den Mischvorgang, Transport, Einbau und die Oberflächenvermessung ein, da dort in diesem Zusammenhang die meisten Daten angefallen sind und verarbeitet werden konnten.

Zur Synchronisation ist ein Datenformat zu definieren, welches allen Partnern zuvor bekannt sowie idealerweise einheitlich aufgebaut sein sollte. Insbesondere auch im Hinblick auf die gezielte Datenauswertung wurde dazu vor Baustellenbeginn ein gemeinsames Lastenheft definiert (s. Kapitel 2.1.1). In diesem hat jeder Partner definiert, welche Messdaten er zur Verbesserung bzw. zur Analyse seines Prozessschrittes bereitstellen kann und auch insbesondere, welche Messdaten er von anderen Stellen zur Verbesserung seines Prozessschrittes benötigen würde. Ein Beispiel dafür ist z.B. die Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen an der Mischanlage sowie die erwartete Ausstoßleistung an der Mischanlage für Ober- und Unterbeton, da ansonsten der Fertiger nicht abschätzen kann, wann und in welcher Qualität ihm Betonarten angeliefert werden. Neben der Art der Daten ist dazu angegeben, in welchem Datenformat und mit welcher Abtastrate die Signale vorliegen.

Daten, welche von getrennten Messsystemen aufgezeichnet werden, müssen sich auf eine gemeinsame Datenbasis beziehen. Sofern Signale zeitbasiert vorliegen, wie im Falle der Mischanlage, des Transports und des Einbaus, müssen diese eine einheitliche Zeitachse aufweisen. In diesem Fall wurde vereinbart, dass die relevanten Teilprozesse die GPS-Zeit als Referenz mit aufzeichnen sollten. Im Falle der Baustellen Köln-Wahn und Wittlich wurde sowohl an der Mischanalage als auch am Fertiger die GPS-Zeit aufgezeichnet.

Sobald der Einbau der Betonfahrbahn erfolgte, ist neben einer zeitlichen auch eine örtliche Synchronisation erforderlich. So werden die darauffolgenden Schritte der Nachbearbeitung und Oberflächenscans zeitversetzt positionsbasiert aufgezeichnet. Um eine Zuordnung der Einbauposition zur Nachbearbeitung und Oberflächenanalyse zu ermöglichen, wird die Position aller Teilnehmer mithilfe der GPS-Position erfasst. Eine detailliertere Beschreibung der Synchronisation ist in AP C3 im Zusammenhang mit der digitalen Vernetzung gegeben.

5.1.7.2 Vergleich Temperatur- und Umgebungsmessungen

In einem ersten Schritt wird die Datensynchronisation und -verifikation anhand der aufgezeichneten Temperaturdaten vorgenommen. Dazu sind in Abbildung 5-133 und Abbildung 5-134 drei exemplarische Tage in Köln-Wahn dargestellt.



Abbildung 5-132: Übersicht der Temperaturmesswerte an der Mischanlage, am Fertiger und an den Wetterstationen (ohne Labormessungen) am 14.08.2018 (oben) und 18.08.2018 (unten)

In Abbildung 5-133 sind die Daten der Mischanlage, der Wetterstation des DWD und des Fertigers synchronisiert dargestellt. Abbildung 5-134 zeigt zusätzlich noch die aufgezeichneten Daten der Frischbetonlaboruntersuchungen an der Mischanlage (Schnorpfeil, ISYS) und am Fertiger (Fremdüberwacher), welche am Untersuchungstag stündlich aufgezeichnet wurden. Dabei zeigt sich bereits, dass die Synchronisation aufgrund der GPS-Zeitstempel möglich ist. In diesem Fall wird die Darstellung normiert auf den Startzeitpunkt des Fertigers (t=0min) dargestellt. Die beiden Mischer in der Mischanlage stellen jeweils eine Umgebungs- (grün durchgezogen) und Betontemperatur (grün gestrichelt) zur Verfügung. Dabei zeigt sich, dass die Betontemperatur in der Regel höher ist als die Umgebungstemperatur. Dies ist durch den Mischprozess bedingt. Aussetzer in der Temperaturmessung entstehen zu den Zeiten, in denen die Mischanlage stillsteht, da die Aufzeichnung zu diesen Zeiten unterbrochen wird. Die Wetterstation des DWD liefert Lufttemperaturmessungen sowohl in 5 cm als auch 2 m Höhe. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Lufttemperatur in 5 cm Höhe der Oberflächentemperatur des Bodens entspricht. Der Fertiger stellt zum einen Umgebungstemperaturdaten mithilfe der verbauten Wetterstation als auch Oberflächentemperaturen des eingebauten Betons mithilfe der Wärmekamera zur Verfügung.



Abbildung 5-133: Übersicht der Temperaturmesswerte an der Mischanlage, am Fertiger, an den Wetterstationen und bei den Labormessungen am 28.06.2018 auf der Baustelle Köln-Wahn.

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Daten des Besichtigungstags, für den ebenso Labormessungen sowohl an der Mischanlage als auch am Fertiger vorliegen, in Abbildung 5-135 nach Luft- und Oberflächentemperaturen getrennt dargestellt.



Abbildung 5-134: Detaillierterer Vergleich der Temperaturverläufe der Luft (oben) und des Betons (unten) am 28.06.2018.

Die Lufttemperatur sollte idealerweise nur geringe Abweichungen aufweisen. Die Daten der Mischanlage, der Labormessungen an der Mischanlage, des Fertigers und der DWD Wetterstation stimmen gut überein. Leichte Abweichungen zeigen sich lediglich an den Messwerten der Laboruntersuchungen am Fertiger. Dies ist wahrscheinlich auf die starke Sonneneinstrahlung auf der Baustelle zurückzuführen, welche am Messfahrzeug herrschte. Insgesamt zeigt sich jedoch gut, dass die Lufttemperatur annähernd linear von ca. 14 °C auf 25 °C ansteigt.

Betrachtet man die Betontemperaturen, so zeigt sich, dass die Betontemperatur in den Mischern, nach einer anfänglichen Anfahrphase, relativ konstant bei ca. 26 °C gehalten wird. Ähnlich verhalten sich ebenso die Betontemperaturen bei den Laboruntersuchungen an der Mischanlage und am Fertiger. Die Temperaturen liegen jedoch durchgehend ca. 1 bis 2 °C unter den im Mischer gemessenen Betontemperaturen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Mischer im Betrieb von sich aus Wärme produzieren sowie die Betontemperatur nach Entnahme aus dem LKW bereits durch die geringere Umgebungstemperatur leicht absinkt. Die Wärmebildkamera zeigt den Verlauf der Betontemperatur direkt nach dem Einbau an. Hieran ist ersichtlich, dass die Wärmebildkamera einen Offset zu den anderen Betonmessungen aufweist. Gründe dafür sind in Kapitel 5.1.4.3 beschrieben. Vernachlässigt man den Offset, so zeigt der eingebaute Beton einen ähnlichen Temperaturverlauf wie der Frischbeton. Insbesondere im späteren Verlauf des Tages zeigt sich ebenso ein leichter Temperaturanstieg, welcher durch die steigenden Luft- und Bodentemperaturen erklärbar ist.

Zusammenfassend zeigt dieses Beispiel, dass die Synchronisation der unterschiedlichen Datenquellen erfolgreich durchgeführt werden kann.

5.1.7.3 Synchronisation von Betonchargen und zugehöriger Einbauposition

In einem nächsten Schritt wird die Synchronisation sowohl zeit- als auch positionsbasiert durchgeführt. Dies ist, wie zuvor beschrieben, erforderlich, da eine eindeutige Zuordnung der gefertigten Chargen zur tatsächlichen Einbauposition notwendig ist. Ein Abgleich zwischen Mischer, Transport und Fertigerdaten erfolgt dabei zeitbasiert. Sobald der Beton jedoch verbaut ist, erfolgt die Zuordnung auf Basis der Einbauposition. Dabei erfolgt der Abgleich zwischen Fertiger, Nachbearbeitung und Oberflächenscans auf Basis dieser Position. Am Fertiger muss somit sowohl ein Abgleich der zeitbasierten Chargendaten als auch die Zuordnung der Chargen zur Einbauposition stattfinden. Da auf der Baustelle Köln-Wahn nur wenige hundert Meter Transportweg bestanden und keine Überwachung der Transportkette stattfand, wird angenommen, dass die Chargen in der Reihenfolge, in der sie produziert wurden, auch am Fertiger ankommen und verbaut werden.

Um eine bessere Auflösung sowie eine aussagekräftige Größe zu erhalten, werden die Chargen in produzierten Beton in Kubikmeter umgerechnet. Als Kenngröße für den eingebauten Beton wird der Verfahrweg des Fertigers verwendet. Damit ergibt sich eine Umrechnung von Chargen in produziertes Volumen über die Anzahl der Chargen N_{Ch} :

$$V_{prod,Ch} = N_{Ch} \cdot 2.5m^3$$

Ein LKW befördert jeweils 4 Chargen:

$$V_{prod,LKW} = 4 N_{Ch} \cdot 2.5 m^3 .$$

Analog dazu wird der Verfahrweg *d* des Fertigers in ein "verbrauchtes" Volumen umgerechnet:

$$V_{verbr,Fert} = h_{Einbau} \cdot b_{Fert} \cdot d$$
 .

In einem ersten Schritt kann damit die Produktion an der Mischanlage mit der verbrauchten Betonmenge am Fertiger abgeglichen werden. Dies ist exemplarisch in Abbildung 5-136 dargestellt. Die obere Darstellung zeigt die berechnete produzierte Betonmenge an der Mischanlage (grün) im Vergleich zu der am Fertiger verbrauchten Betonmenge (blau). Es zeigt sich, dass die Mischanlage zeitlich um etwa eine halbe Stunde versetzt zum Fertiger arbeitet. Dies ist auch logisch, da der Beton in dieser Zeit von der Mischanlage zum Fertiger transportiert werden muss. Um ca. 11:20 Uhr wird der Graben in der Mitte der Fertigungsspur überquert. Hierbei fährt der Fertiger, es wird jedoch kein Beton eingebaut. Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine eindeutige Erkennung der Betriebszustände des Fertigers implementiert werden konnte, wird dies in der Synchronisation ebenso als Einbauweg ausgewiesen, obgleich kein Einbau stattfindet. In der unteren Darstellung ist zusätzlich die Geschwindigkeit des Fertigers angezeigt.

Wie bereits in Kapitel 5.1.4.3 erläutert, treten immer wieder Maschinenstillstände auf. Vereinfacht können die Daten in diesem Zustand bereits dazu genutzt werden, um eine Prädiktion der Einbaugeschwindigkeit anhand der produzierten Betonmenge an der Mischanlage durchzuführen. Diese Prädiktion evaluiert dazu die Produktionsmenge und -zeit der letzten 10 Chargen und schätzt auf Basis dieser die mögliche Geschwindigkeit des Fertigers ab, die notwendig ist, um diese Menge ohne Stillstand zu verarbeiten. Dabei zeigt sich, dass sich im Mittel eine deutlich geringere Geschwindigkeit erreicht wird. Aktuell liegt jedoch noch keine Auswertung vor, ob Maschinenstillstände die Einbauqualität beeinflussen oder ob z.B. eine langsamere und stetige Geschwindigkeit zu einer Verbesserung der Einbauqualität führt.



Abbildung 5-135: Synchronisation der Daten der Mischanlage und des Fertigers.

Mithilfe dieser Daten sowie dem Zeitstempel kann nun ebenso auf die Transportdauer rückgeschlossen werden. Zusätzlich können die Oberflächenscans mithilfe der GPS-Position in einen äquivalenten Verfahrweg umgerechnet werden. Das Ergebnis einer solchen Synchronisation ist in Abbildung 5-137 dargestellt.



Abbildung 5-136: Synchronisierte Darstellung der Endleistung der Mischanlage, der Transportzeit, der Einbaugeschwindigkeit und der Oberflächenebenheit über einen Einbautag anhand der erfassten Daten der Baustelle Köln-Wahn

In diesem Fall wurde als "Qualitätskenngröße" der Mischanlage die Endleistung vor Entleerung, die Transportzeit, die Einbaugeschwindigkeit des Fertigers und die Oberflächenbeschaffenheit also die Ebenheit der Fahrbahn gewählt. Prinzipiell können hier jedoch beliebige aufgezeichnete Größen gewählt werden. Nach etwa 290 m³ überquert der Fertiger den Graben in der Mitte des Bauabschnitts. Da dieser Weg aktuell ebenso noch als Einbauweg definiert ist, wird dieser Bereich an der Mischanlage und beim Transport ergänzt (grauer Balken) auch wenn effektiv kein Beton produziert wird. Insgesamt zeigt sich, wie bei der einzelnen Analyse in Kapitel 5.1.2 bereits erwähnt, dass die Endleistung bei etwa 45 kW liegt und ohne erkennbaren Zusammenhang schwankt. Die Transportzeit, welche aufgrund der Rückrechnung sowohl Anfahrtszeit des LKW als auch das Warten dieses vor dem Fertiger, Abladen und Verteilen mit dem Bagger beinhaltet, liegt im Mittel bei etwa 30 min. Die Transportzeit steigt zum Ende des Einbauzeitraums an, da dort dann Einzelanforderungen erfolgen, sodass nicht zu viel Beton produziert wird. Die Geschwindigkeit liegt bei etwa 1m/min mit einigen Stopps zwischendurch. Bei der Befahrung der Oberfläche wurde darauf geachtet, alle Fahrspuren getreu den Fertigerbahnen abzufahren. Teilweise war dies jedoch nicht durchgängig möglich. In diesem Fall ist die Befahrung erst ab ca. 55 m erfolgt. Die Ebenheit der Fahrbahn ist in diesem Fall als verallgemeinerte 4 m-Richtlatte dargestellt. Dazu wurde alle 20 cm eine 4x4 m Ebene in die Oberflächenscans im Least Squares Sinne gefittet. Die mittlere Abweichung der Messpunkte zu dieser Ebene ist als Linie dargestellt. Des Weiteren ist die Standardabweichung zu diesem Mittelwert grau hinterlegt eingezeichnet. Es zeigt sich, dass Abweichung über die gesamte 4x4 m Ebene nur im Bereich zwischen 70 m und 75 m den Grenzwert von 2 mm (durch die Betragsdarstellung, ansonsten +/-2 mm) überschreitet. Der Bereich zwischen 70 m und 75 m entspricht jedoch genau dem Graben, in dem von Hand eingebaut wurde.

Um den Grund für die Abweichung genauer zu identifizieren ist dieser Ausschnitt in Abbildung 5-138 a) nochmals als Oberflächenscan dargestellt. Die große Ebenheitsabweichung und Streuung ist einem Schachtdeckel zuzuordnen. Die Ebenheit des umgebenden Handeinbaufeldes liegt unter 2 mm Abweichung. Da der Schachtdeckel nicht automatisiert eingebaut wird, tritt hier eine größere Abweichung auf, welche sich nicht direkt vermeiden lässt. Abbildung 4.138 b) zeigt zusätzlich einen Ausschnitt, in dem der Querschnitt deutlich erkennbar ist. Zudem zeigt sich hier, dass am Rand der Platte ebenso ein leichter Versatz zur nächsten Platte auftritt.



Abbildung 5-137: Beispiele der Oberflächenebenheit: a) Handeinbaufeld und Schachtdeckel, b) Fugenschnitt

Insgesamt zeigt sich dadurch, dass bereits mit den erfassten Daten auf der Baustelle Köln-Wahn eine gute Korrelation zwischen den einzelnen Prozessschritten erfolgen kann, um einzelne Effekte zu betrachten und z.B. eine Unebenheit einer Position, einem Zeitstempel und einer Charge zuzuordnen. Diese Vorarbeit kann in einem nächsten Schritt verwendet werden, um einen Echtzeitdatenaustausch sowie eine -analyse im Zuge digitalen Vernetzung zu ermöglichen. Ziel ist es, bereits während der Produktion bzw. des Einbaus Probleme zu erkennen und diesen entgegensteuern zu können.

Zusätzlich zu den erfassten Maschinen-Daten wurde eine allgemeine Bewertung der Baustellentage durch die Firma Schnorpfeil durchgeführt. Dazu wurden die generellen Kenngrößen der Baustelle erfasst sowie um eine subjektive Bewertung der Baustellenleiter ergänzt. Ein Ausschnitt der Daten ist in Tabelle 5.9 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Bewertung der ersten beiden Einbautage als "schlecht" erfolgt. Da dies die ersten beiden Einbautage mit der neuen Mischanlage waren, ist die Bewertung auf Schwierigkeiten mit dieser sowie auf die daraus resultierende schlechte Abstimmung mit dem Fertiger zurückzuführen. Dies zeigt sich ebenso in der Bewertung der Gleichmäßigkeit der Konsistenz. Diese weist in den beiden ersten Tagen leichte bis starke Schwankungen auf. Eine solche subjektive Bewertung ergänzt die automatische Datenaufzeichnung an den Maschinen gut, da in diesem Fall konkrete Hinweise gegeben werden können, welche Probleme an dem jeweiligen Tag auftraten.

Datum	Anlage zu Baustelle	Mischer größe	Festigke itsklasse	Zement gehalt	w/z- Wert	Zeme ntart	Luft- temp. min	Luft- temp. max	Temp. bereich Luft	Witter- ung	Beton- temp min	Beton- temp max	mittlere Beton- temp.	Temp bereich Beton	Gleich- mäßigkeit Konsis.	LP- Gehalt	Bewertung Einbautag
13/06/18	0.5 km	2.5 m ³	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	16°C	19°C	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Sonne	20°C	23°C	21.5°C	hohe Betontemp. (20-25°C)	leichte Schwan- kungen	Okay	Schlecht
14/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	13	18	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Trocken	21	24	22.5	hohe Betontemp. (20-25°C)	starke Schwan- kungen	Okay	Schlecht
18/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	17	19	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Trocken	22	25	23.5	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
19/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	20	26	hohe Lufttemperatur (20-30 °C)	Sonne	23	26	24.5	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
21/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	18	18	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Sonne	24	24	24	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
27/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	14	21	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Sonne	21	25	23	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
28/06/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	18	24	hohe Lufttemperatur (20-30 °C)	Sonne	22	25	23.5	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
05/07/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	19	25	hohe Lufttemperatur (20-30 °C)	Sonne	24	27	25.5	sehr hohe Betontemp. (> 25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
09/07/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	16	24	hohe Lufttemperatur (20-30 °C)	Sonne	23	26	24.5	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
16/07/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	19	20	mittlere Lufttemperatur (10-20 °C)	Sonne	19	20	19.5	mittlere Betontemp. (15-20°C)	gleichmäßig	Okay	Gut
18/07/18	0.5	2.5	C 35/45	350	0.40	CEM I 42,5 N	18	26	hohe Lufttemperatur (20-30 °C)	Sonne	22	26	24	hohe Betontemp. (20-25°C)	gleichmäßig	Okay	Gut

Tabelle 5.9: Manuelle Bewertung der Einbautage der Baustelle Köln-Wahn durch Baustellenleiter

5.1.7.4 Herausforderungen bei der Datenaufzeichnung und -synchronisation

Zuletzt sei an dieser Stelle nochmals zusammenfassend auf Herausforderungen und auftretende Schwierigkeiten verwiesen. Diese sind im Folgenden stichpunkthaft zusammengefasst:

- Eine wichtige Rolle spielt zunächst die Sichtung der Rohdaten und eine Definition der Messsignale sowie deren Abtastrate und Einheit. Diese wurden in diesem Zusammenhang mithilfe eines Lastenhefts identifiziert.
- Bei der Aufbereitung der Daten ist darauf zu achten, dass entweder alle Signale von einem zentralen Messsystem aufgezeichnet werden (was in der Regel nicht möglich ist) oder die Messsysteme untereinander synchronisiert werden. Dazu wird in diesem Fall die GPS-Zeit und Position verwendet, welche global zur Verfügung steht.
- Die Daten müssen unter Umständen noch aufbereitet und gefiltert werden. So müssen eventuell auftretende Maschinenvibrationen oder Signalausfälle zuverlässig erkannt werden können.
- In diesem Zusammenhang ist es ebenso wichtig, den Zustand der Maschine zu kennen. Im Falle der Mischanlage muss eine Unterscheidung zwischen regulären Mischungen und Test-/Reparatur- und Reinigungsmischungen möglich sein. Beim Fertiger sollte erkennbar sein, ob aktuell Beton eingebaut wird oder ob der Fertiger zu einem anderen Ort ohne Betoneinbau fährt.
- Für die Synchronisation müssen die Daten zunächst weiter aufbereitet werden. Dazu müssen einzelne Mischungen richtig klassifiziert werden und eindeutig einem Einbauort zuordenbar sein.
- Sinnvollerweise sollte ein Abgleich der Daten erfolgen, um eventuelle Ungereimtheiten oder andere Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Dies wurde hier vereinfacht mithilfe des Temperaturvergleichs durchgeführt.
- Zudem wäre eine Überwachung der Transportkette bzw. der auftretenden Ereignisse bei einer weiteren Analyse sinnvoll, um bestimmte Effekte genauer zuordnen zu können.

- Allgemein fehlt an manchen Stellen eine eindeutige Definition der Betonqualität, welche sich auch im realen Baustellenbetrieb nachvollziehen und durch Messungen belegen lässt.
- 5.1.8 A1.8 Identifizierung aller prozessrelevanten Daten auf der Teilprozessebene sowie Definition von Schnittstellen für die digitale Vernetzung

In diesem Arbeitspaket wird die Abstimmung der prozess-relevanten Daten sowie der Schnittstellen, die vom Betonfertiger, dem Betonmischer und sonstigen Prozessbeteiligten bereitgestellt werden, für eine Live-Ansicht des Prozesszustandes und für eine spätere Dokumentation des Bauprozesses erarbeitet. Ziel dieses APs ist es, qualitätsrelevante Daten zu identifizieren, welche für die digitale Vernetzung sinnvoll genutzt werden können. Dabei muss auch geklärt werden, ob sinnvolle Daten mit aktuellen Methoden erfasst werden (können) und wie diese im Anschluss verarbeitet werden müssen. Manche Daten davon, wie z.B. die sich vor der Abziehbohle aufbauende und rollende "Wurst", sind rein subjektiv zu erfassen oder bedingen viel Erfahrung. Andere Messwerte können gut automatisiert erfasst werden, unterliegen jedoch mitunter großen Schwankungen, so z.B. die (ungestützte) GPS-Position. Dabei wird eine Bereitstellung der Daten über eine Mobilfunkbzw. internetbasierte Infrastruktur angestrebt. Bevor jedoch Schnittstellen für die digitale Vernetzung definiert werden können, ist es notwendig prozessrelevante Daten zu identifizieren. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, diese Betrachtung einerseits auf Basis des Ist-Stands, also den an der Maschine verfügbaren Daten, als auch des Wunsch-Stands, also den gewünschten oder für eine qualitative Betrachtung erstrebenswerten Daten, durchzuführen. Dazu wurden im Zuge eines Qualitätsworkshops am ISYS von allen Projektpartnern Anforderungen sowie aus ihrer Sicht die wichtigsten Einflussgrößen vorgestellt und diskutiert.

5.1.8.1 Regelungstechnische Herangehensweise

Bevor im Rahmen des Workshops über qualitätsrelevante Daten beraten werden konnte, wurden verschiedene Sichtweisen auf die Definition der Qualität einer Betonfahrbahn diskutiert. Gerade im Sinne einer systemdynamischen Sicht, wie in Abbildung 5-139 vereinfacht dargestellt, muss ein zu regelndes System zunächst hinsichtlich der Datengrundlage und dem Ziel der Untersuchung betrachtet werden. Auf Basis dieser ersten Bewertung werden dann die Grenzen des Systems definiert. Im Zusammenhang des Betonstraßenbaus beginnt das System z.B. mit der Anlieferung der Rohstoffe, über den Mischprozess, den Transport und Einbau bis hin zur Nachbearbeitung. Nicht Bestandteil sind aber die Anlieferung der Rohstoffe selbst sowie die Schritte zur finalen Freigabe der Betonfahrbahn für den Straßenverkehr.

Als nächstes kann eine formale Systembeschreibung aus den Beobachtungen, Beschreibungen und Systemabläufen erstellt werden. Dieses System wird meist als zu regelnde Strecke bezeichnet, wie in Abbildung 5-139 illustriert. Dabei ist die Modellierungstiefe dem Einsatzgebiet der Modelle und den abzubildenden Effekten anzupassen. Da in diesem Fall sowohl der generelle Ablauf der Baustelle hinsichtlich Logistik als auch z.B. der Mischvorgang an sich relevant sind, kommen dementsprechend verschiedene Modelltiefen zum Einsatz, welche verschiedene detaillierte Messgrößen benötigen. Gerade im Hinblick auf eine Regelung des Systems müssen für das System relevante Messgrößen hinreichend schnell und genau erfasst werden können. Sofern einzelne Größen zwar für das Systemverhalten relevant aber nicht messtechnisch erfassbar sind, wie z.B. die rheologischen Eigenschaften des Betons während des Mischvorgangs, so müssen diese z.B. durch einen Beobachter aus anderen direkt messbaren Größen rekonstruiert oder geschätzt werden. Ein Ziel des ISYS im Rahmen dieses Projektes ist es, ein geeignetes Streckenmodell zu finden und an die messbare und nicht messbare Datengrundlage anzupassen. Wie im nächsten Kapitel näher beschrieben, muss dazu zunächst das Ziel und die Beschreibungsgröße des Ziels, nämlich der Verbesserung der Qualität des Fahrbahnbaus, definiert werden.



- u ... Eingänge/Stellgrößen
- $\mathcal Y$... Ausgänge/Messwerte
- *d*... Störgrößen
- \mathcal{X} ... Interne Zustände/Rekonstruktion

Abbildung 5-138: Regelungstechnische Betrachtung eines Systems

5.1.8.2 Ermittlung qualitätsrelevanter Daten

Die wichtigsten Ergebnisse der Diskussionen mit den Projektpartern zum Thema "Wann ist eine Fahrbahn (qualitativ) gut?" sind im Folgenden kurz zusammengefasst. Dazu wurde zunächst bewertet, wie die Projektteilnehmer "Qualität" an sich definieren und wie diese im Rahmen des Projekts einzuordnen und auf Teilaspekte herunterzubrechen ist.

Wann ist eine Fahrbahn qualitativ gut?

Bei der allgemeinen Definition der Qualität im Betonstraßenbau zeigten sich dabei verschiedene Fokusse bzw. Betrachtungsebenen:

- Nutzerbezogen: "Angenehmes Fahrerlebnis"
- Fahrbahnbezogen: Haltbar-/Langlebigkeit, Ebenheit, Griffigkeit
- Prozessbezogen: Störungsfrei, konstant
- Einhaltung von Spezifikationen/Anforderungen

Im Rahmen des Kooperationsprojekts wird der Fokus dabei vor allem auf prozessbezogene Größen gelegt. Durch eine Verbesserung des Fertigungsprozesses und der Vermeidung von Schwankungen können die relevanten prozessbezogenen Größen, z.B. der Betonkonsistenz sowie des Bürstzeitpunkts, hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die eigentlich zu verbessernden Qualitätseigenschaften der Fahrbahn heruntergebrochen werden. So beeinflusst z.B. die Betonkonsistenz die Ebenheit der Fahrbahn aber auch deren Dauerhaftigkeit und den Zeitpunkt des Bürstens sowie die daraus resultierende Griffigkeit.

Tabelle 5.10: Was ist der wichtigste Qualitätsparameter/-indikator des jeweiligen Teilprozesses?

Baustelle	Mischen	Einbau	Nachbearbeitung	Überwachung
Spezifikationen ein-	Hohe Ausstoßleis-	Kontinuierlicher Ein-	Rissfreie Fugenaus-	Gleichbleibende Ei-
halten	tung	bau	bildung	genschaften

Da eine Betonfahrbahnherstellung aus verschiedenen Teilschritten wie Mischen, Einbau und Nachbearbeitung besteht sowie im Rahmen dieses Projekts auch unterschiedliche Ebenen, z.B. Maschinenhersteller, Baustellenkoordinatoren sowie Subunternehmer, betrachtet werden, unterscheidet sich auch die Sichtweise auf die "Qualität". Betrachtet man die unterschiedlichen Teilprozesse und stellt die Frage "Was ist der wichtigste Qualitätsparameter Ihres jeweiligen Teilschritts", so erhält man durchaus verschiedene Antworten wie in Tabelle 5.10 dargestellt. Frägt man weiter, welche Faktoren die Qualität im jeweiligen Prozessschritt am meisten beeinflussen, so ergeben sich ebenso sehr vielfältige Anforderungen. Während aus Sicht eines Baustellenbetreibers z.B. das genaue Einmessen des Leitdrahts eine große Rolle, auch kostentechnisch, spielt, ist die Konsistenz ein wichtiger Faktor für die Maschinenhersteller. Änderungen in der Rezeptur und am Beton an sich spielen eine sehr zentrale Rolle. Die Nachbearbeitung und die Überwachung wiederum zeigt größeres Interesse an den Rohstoffen an sich.

Baustelle	Mischen	Einbau	Nachbearbeitung	Überwachung
Fahrdraht (Abste- ckung)	Konsistenzmessung	Betonkonsistenz (flüssig/ fest)	Änderung Beton	Ausgangsstoffe (Feuchte, Fein)
Transport- anlieferung	Sandfeuchte (Messung)	Kontinuierlicher Einbauprozess	Zeitpunkt Schneiden, Bürsten	Betoneigenschaf- ten (Kalibrierung)
Betonzusammen- setzung	Kernfeuchte Ge- stein	Referenz (Leit- draht, 3D)	Personal	Mensch

Tabelle 5.11: Was beeinflusst die Qualität in Ihrem Teilprozess (am meisten)?

Während zuvor vor allem die einzelnen Teilprozessschritte betrachtet wurden, so unterscheidet sich auch je nach Baustellenbeteiligter das Verständnis des Haupteinflussfaktors auf die Produktqualität der Fahrbahn. Tabelle 5.12 zeigt, dass durchaus unterschiedliche Meinungen existieren, diese sich jedoch meist auf die Betonqualität bzw. Gleichmäßigkeit der Herstellung beziehen sowie auf den Faktor Mensch.

Tabelle 5.12: Was beeinflusst aus Ihrer Sicht die Produktqualität der Fahrbahn (am meisten)?

Baustelle	Mischen	Einbau	Nachbearbeitung	Überwachung
(Dis-)kontinuierli- che Fertigung	Messdatenerfas- sung/-genauigkeit	Betonqualität	Schwankung Beton	Ausgangsstoffe (Feuchte, Fein) / Einwaage
Schwankungen Be- ton	Logistikstörungen	Zeitpunkt Bürsten	Unregelmäßigkeit Einbau	Zusatzmittel
Schwankung Ma- schinensteuerung	Rheologie	Zeitpunkt Schnei- den	Personal	Mensch

Dies bedeutet aus systemdynamischer Sicht, dass zwei Ziele zu erfüllen sind: Erstens sollte die Gleichmäßigkeit des Betons gewährleistet werden, also eine hohe Gleichförmigkeit der Frischbetoneigenschaften erreicht werden, und zweitens sollte der Maschinenbediener in seiner Funktion unterstützt werden. Diese zwei Ziele sind auch die Kernergebnisse, welche in AP B (prozesssichere Teilschritte) und AP C2 (Regelung und Qualitätskontrolle) und C3 (intelligente Vernetzung und Kommunikation) mit entsprechenden Lösungen umzusetzen sind.

Die Ergebnisse des Workshops sind ebenso in Abbildung 5.140 und Abbildung 5-141 nochmals detaillierter dargestellt. Dabei kennzeichnen rot markierte Felder die wichtigsten Qualitätsgrößen im Rahmen dieses Forschungsprojekts und grün markierte Felder notwendige Messgrößen, die zur Erreichung und/oder Charakterisierung dieser Qualitätsfaktoren zu bestimmen sind.



Abbildung 5-139: MindMap zur Qualität I: Fahrbahnqualität

Arbeitsschwerpunkt A - Prozessanalyse der heutigen Betonfahrbahnherstellung



Abbildung 5-140: MindMap zur Qualität II: Fahrbahnherstellung

Zusammenfassend wurde in AP A1 untersucht, wie der Ist-Stand des Fertigungsprozesses und der Datenerfassung auf einer Baustelle ist. Dazu wurde z.B. anhand der verfügbaren Maschinenparameter analysiert, wie groß typische Schwankungen der Einwaagemengen oder der generellen Produktion im realen Baustellenalltag sind und welche Ursachen diese Schwankungen haben. Im Rahmen von Diskussionen und Workshops wurde, wie zuvor beschrieben, zudem die qualitative Zuordnung von Messgrößen zu Qualitätsparametern hergeleitet. Eine weitere Herausforderung stellt neben der qualitativen auch die tatsächliche quantitative Zuordnung der Qualitätsparameter zu den Messgrößen, die erfasst werden können, dar. Gerade in Bezug auf eine Modellierung bzw. Regelung eines Prozesses ist eine solche Zuordnung wichtig. Abbildung 5-142 stellt dies nochmals zusammenfassend am Beispiel der Mischanlagendaten dar. Nach aktuellem Stand ist die quantitative Zuordnung wie auch die Feinheiten der qualitativen Zuordnung noch nicht im Detail bekannt. Zusätzlich sind direkte Messmethoden zur Erfassung der Betonqualität im Betrieb teilweise nur manuell bzw. mit einer zu niedrigen Abtastrate (z.B. LP-Topf alle Stunde) verfügbar. Dementsprechend werden in AP B zum einen Messmethoden entwickelt, die eine direkte Erfassung von Qualitätskenngrößen bieten. In AP C wird zudem eine einheitliche Datenbank sowie ein Datenmanagement- und Analysetool eingeführt.



Abbildung 5-141: Herausforderung der Zuordnung messbarer Größen zu Qualitätsindikatoren am Beispiel der Mischanlage

5.1.8.3 Grundgedanke Schnittstellen digitale Vernetzung

Um die zuvor beschriebenen Daten automatisiert und entsprechend der Prozessschritte zugeordnet zu erfassen, wurden in einem ersten Schritt Konzepte und Schnittstellen einer Datenbankanwendung erarbeitet. Die digitale Vernetzung im Baustellenbereich erfordert Lösungen, welche es ermöglichen, Daten automatisiert zentral zu sammeln und auszuwerten. Dazu bieten internetbasierte Schnittstellen sowie Benutzerterminals ein erhöhtes Potential in Bezug auf die stark örtlich verteilten Teilnehmer einer Baustelle, wie beispielsweise Mischwerk, Fertiger, etc.. Weiter hat ein einheitliches Protokoll bzw. eine einheitliche Schnittstelle den Vorteil, dass die Daten nicht unnötig transkodiert werden müssen, damit sie im zentralen Leitstand dokumentiert bzw. weiterverarbeitet werden können.

Im Rahmen des Projektes wurden dementsprechend Schnittstellen erarbeitet, welche es ermöglichen, prozessrelevante Daten von den beteiligten Maschinen auf einem zentralen Server zu erfassen. Ausgehend von ersten Konzepten, wie z.B. der Übertragung von Datenpaketen des Betonfertigers über eine Telematikanwendung per VPN-Tunnel an den digitalen Leitstand an der Universität Stuttgart oder der Anbindung der Mischanalgendatenbank über eine direkte VPN-Verbindung, wurde dabei eine konkrete Umsetzung entworfen, wie in AP C3 gezeigt werden wird.

Im Zusammenhang mit der Baustellenanalyse in Köln-Wahn und Wittlich wurden in diesem Zusammenhang erste Erfahrungen gesammelt. Ziel der ersten Baustellenkampagne war es, möglichst alle verfügbaren und eventuell interessanten Größen aufzuzeichnen und deren Potential zu identifizieren. Dementsprechend wurden eine Vielzahl an Größen erfasst, welche zu einem Großteil in den vorigen Kapiteln auch nicht erwähnt wurden. Dies liegt zum einen daran, dass diese für die gesamtheitliche Betrachtung wenig relevant sind. So wurden z.B. auch Motordrücke des Fertigers mit aufgezeichnet, welche vor allem für den Fertiger, aber nicht für andere Prozessteilnehmer relevant sind. Andererseits erfolgte die Abtastung in vielen Fällen mit einer relativ hohen Abtastrate. So wurde z.B. die Betontemperatur mit 10Hz und mehr aufgezeichnet. Andere Größen

wären für eine Analyse wiederum in einer höheren Abtastung interessant, wie z.B. Frisch- und Festbetonuntersuchungen.

No. Contraction of the			Logistik	
- Joseph and State of		M		
	Fertiger	Handfeld	Transportfahrzeug	Sattel
Тур	Doppelanlage l	_iebherr MobilMix 2.5	Anzahl	5
Produzierte Chargen	4303	982	Mittlere Transportzeit	10 min
Produziertes Volumen	10812 m ³	2410 m ³	Mittlere Rundenzeit	21 min
Einbautage	29 d	20 d	Mittlere Befüllzeit	3 min
Betriebsstunden	130.4 h	106.7 h	Chargen pro Stunde	53 1/h
Mittlere Chargenzahl	148.38 1/d	49.1 1/d		
Mittleres Volumen	372.8 m ³	120.5 m ³		
Mittlere Ausstoßleistung	83.84 m ³ /h	21.66 m ³ /h		
Mittlere Betriebsstunden	4.5 h/d	5.3 h/d		
			Machbearbeitung	
40		0)*
Тур	Wirtgen Glei) tschalungsfertiger Typ	Querfugen	2x FS 41 Lissmac Querba
Typ Einbautage	Wirtgen Glei SP94 23) tschalungsfertiger Typ	Querfugen Längsfugen	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac 2x FS 41 Lissmac Längsbau
Typ Einbautage Einbaustunden	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges) tschalungsfertiger Typ schätzt)	Querfugen Längsfugen Schnitttiefe quer	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm
Typ Einbautage Einbaustunden Eingebaute Strecke	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges 3255 m (ges) tschalungsfertiger Typ schätzt) schätzt)	Querfugen Längsfugen Schnitttiefe quer Schnitttiefe längs	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm 16 cm
Typ Einbautage Einbaustunden Eingebaute Strecke Eingebauter Beton	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges 3255 m (ges 11874 m ³ (g) tschalungsfertiger Typ schätzt) schätzt) eschätzt)	Querfugen Längsfugen Schnitttiefe quer Schnitttiefe längs Mittlerer Schnittbeginn nach Einbau	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm 16 cm 08 h 32 min
Typ Einbautage Einbaustunden Eingebaute Strecke Eingebauter Beton Mittlere eingebaute Strecke	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges 3255 m (ges 11874 m ³ (g e 141.5 m/d (g) tschalungsfertiger Typ schätzt) schätzt) eschätzt) geschätzt)	Querfugen Längsfugen Schnittliefe quer Schnittliefe längs Mittlerer Schnittbeginn nach Einbau Minimaler Schnittbeginn nach	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm 16 cm 08 h 32 min 05 h 00 min
Typ Einbautage Einbaustunden Eingebaute Strecke Eingebauter Beton Mittlere eingebaute Strecke	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges 3255 m (ges 11874 m ³ (g e 141.5 m/d (g h 516.3 m ³ /d () tschalungsfertiger Typ schätzt) schätzt) eschätzt) geschätzt)	Querfugen Längsfugen Schnittliefe quer Schnittliefe längs Mittlerer Schnittbeginn nach Einbau Minimaler Schnittbeginn nach	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm 16 cm 08 h 32 min 05 h 00 min
Typ Einbautage Einbaustunden Eingebaute Strecke Eingebauter Beton Mittlere eingebaute Strecke Mittlerer eingebauter Betor Mittlere	Wirtgen Glei SP94 23 164.8 h (ges 3255 m (ges 11874 m ³ (g e 141.5 m/d (g h 516.3 m ³ /d (1.14 m/min)) tschalungsfertiger Typ schätzt) schätzt) jeschätzt) geschätzt) (geschätzt)	Querfugen Längsfugen Schnitttiefe quer Schnitttiefe längs Mittlerer Schnittbeginn nach Einbau Minimaler Schnittbeginn nach Einbau Maximaler Schnittbeginn nach Einbau	2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac Querba 2x FS 41 Lissmac Längsbau 11 cm 16 cm 08 h 32 min 05 h 00 min 12 h 00 min

Abbildung 5-142: Beispiel der implementierten Anwendung einer online Anzeige für KW I zur Ansicht genereller Baustellenstatistiken. Daten wurden noch offline erhoben und manuell in Datenbank eingepflegt.

In einem ersten Schritt wurden dabei die Daten aller Projektpartner der Baustelle (KW I) zentral in einem Datenbanksystem zusammengeführt und über eine Webschnittstelle grafisch aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Das Zusammenführen musste dabei noch manuell erfolgen. Abbildung 5-143 zeigt dabei einen Ausschnitt aus der Website, welche zur Anzeige der Daten verwendet wird und den Projektpartnern über den zentralen Server am ISYS zugänglich gemacht wurde. In dem System werden z.B. auf einer Übersichtsseite zunächst statistische Daten zum Umfang und Ablauf der Baustelle, sowie Rahmenbedingungen und beteiligte Partner angezeigt. Unterlagert kann sich jeder Anwender Details zu den erhobenen Messdaten in Form von Zeitverläufen und Diagrammen anzeigen lassen.

Der Zugang zu der Datenbank ist dabei von jedem Rechner oder über mobile Hardware, wie z.B. ein Tablet wie in Abbildung 5-144 gezeigt, möglich. Der Zugang ist durch ein VPN-Netzwerk gegen Zugriffe von Unberechtigten geschützt.



Abbildung 5-143: Mobile Anzeige der Daten auf einem Tablet.

5.1.8.4 Erkenntnisse für die Umsetzung einer Live-View-Applikation

Das Ziel einer Live-View Anwendung unterscheidet sich dabei leicht von der reinen Datenerfassung und -speicherung in einer Datenbank. Für eine Live-Anzeige auf der Baustelle ist es wichtig, die Daten vorzuverarbeiten, zu selektieren und in eine einfach verständliche Struktur umzuwandeln, sodass jeder Prozessteilnehmer die für ihn wichtigen Daten gezielt angezeigt bekommt. Dazu müssen zunächst die relevanten Daten jedes Prozessschrittes identifiziert und in eine echtzeitfähige Anzeige umgewandelt werden. Die Konzepte und Implementierungen werden in AP C3 detaillierter ausgeführt. An dieser Stelle soll kurz auf die anhand der Baustellenanalyse von AP A identifizierten prozessrelevanten Größen eingegangen werden. Diese sind in der folgenden Liste anhand der Prozessschritte unterteilt:

- Baustellenablauf & -management
 - o Aktuelle Auslastung/Ausstoßleistung Mischanlage
 - Aktuelle Transportzeit/-menge
 - o Aktuelle Fertigergeschwindigkeit & -einbaumenge
 - o Räuml. und zeitl. Positionierung der einzelnen TN
 - Fertiger GPS, Einbaumarke (Tablet GPS)
 - o Misch-, Einbau-, Sprüh-, Bürst-, Schneidzeitpunkte und -versatz
 - Anmerkungen/Störungen/Kommunikation
- Prozessüberwachung & -schwankungen
 - \circ Betonproduktion
 - $\circ \quad \text{Leistungsschwankungen}$
 - o Betontechn(olog)ische Parameter?

- Transport(zeit)
- Fertigerenergieeintrag (oder alternatives Bewertungskriterium)
- o Temperatur / Oberfläche nach Fertiger
- Nachbearbeitung(szeitpunkte)
- o Wetter
- Qualitätssicherung
 - Messungen Frischbeton
 - o Bewertung Frischbeton (Mischanlage, Einbau)
 - o Bewertung Ebenheit nach Fertiger
 - ο..
- Prädiktion
 - Betonbedarf/-absprache Mischanlage & Fertiger
 - o Trajektorienplanung hinsichtlich Auslastung & Geschwindigkeit
 - Aushärtevorgang
 - o Bürst- & Schnittzeitpunkt

Die Verfügbarkeit dieser Daten sowie die reale Umsetzbarkeit der Live-Anzeige hängt von verschiedenen Faktoren wie z.B. der Datenerfassung an den Maschinen, der Internetabdeckung auf der Baustelle sowie den Möglichkeiten der Implementierung einer Anzeige (z.B. als Website im Browser oder als App) ab und muss noch konkretisiert werden.

Als Vorbereitung auf die digitale Vernetzung und insbesondere die Live-Anzeige von relevanten Baustellendaten wurden dementsprechend die wichtigsten Parameter identifiziert. Es erfolgte dabei anhand der zuvor dargestellten Liste eine Reduktion der Datenmenge und Abtastung auf relevante (sensitive) Größen und Größenordnungen. Dabei wurden Themen wie Datenverfügbarkeit, Datenformat, Datenübertragungsgeschwindigkeit und Datenabtastung an den angedachten Übertragungskanal und eventuell vorliegende Beschränkungen angepasst. In Zusammenarbeit mit der Firma Wirtgen wurde dazu bereits eine erste Schnittstelle definiert sowie sinnvolle Daten ausgewählt. Ein erster Test der online Datenübertragung über eine Cloudschnittstelle vom Telematiksystem des Fertigers wurde dabei auf der Technikumsmaschine in Aachen erfolgreich abgeschlossen und wird für zukünftige Baustellen vorgesehen. Diese Daten werden in einem nächsten Schritt zur Live-Anzeige vorbereitet, analog zu der Anzeige der Daten über ein Tablet in Abbildung 5-144. Eine Auswertung der Ergebnisse auf der Baustelle Wittlich II ist dabei in AP C3.3 in Kapitel 7.3.3.4 zu finden.

5.2 A2 – ANALYSE DER RHEOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN DES BETONS

Für die derzeit im Betonfahrbahnbau verwendeten Betone müssen Ausgangswerte typischer Frisch- und Festbetoneigenschaften gewonnen werden. Es liegen zudem keine Referenzdaten in Bezug auf deren vom Hydratationsverlauf abhängigen Entwicklung des Erstarrungsverhaltens vor, die mit geeigneten zerstörungsfreien Verfahren zu bestimmen wären, um zielsicher den geeigneten Zeitpunkt feststellen zu können, mit dem die Oberfläche nachbearbeitet werden kann. So gilt es, den geeigneten Zeitpunkt des Bürstens zur Herstellung einer qualitativ hochwertigen Waschbetonoberfläche zuverlässig festzustellen, um einerseits eine hohe Griffigkeit und andererseits eine hinreichende Verbesserung des Lärmschutzes zu erzielen. Gleichermaßen ist es erforderlich, das richtige Zeitfenster mit einem Prüfverfahren zu identifizieren, um den Fugenschnitt nicht zu früh und zugleich nicht zu spät durchführen zu können.

Neben den bekannten Methoden zur Charakterisierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften kommen diverse, speziell für die Bewertung von Fahrbahnbetonen, gewählte Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons wurde zum einen das Gyrometer eingesetzt. Fahrbahnbetone zeichnen sich durch eine hohe Grünstandfestigkeit mit einer sehr hohen Fließgrenze aus. Der Gyrator erlaubt, eine axial aufgebrachte Last mit einer Scherkraft zu überlagern, in dem die obere, auf dem Frischbeton aufliegende Platte gedreht wird. Im Gyrator ist eine Schermesszelle verbaut. Mit dieser lässt sich die resultierende Scherenergie bestimmen, die zur Bewertung der Frischbetoneigenschaften genutzt werden kann. Abhängig der Dauer des Gyrator-Betriebs, lassen sich so Parameterstudien über den Einfluss der Verdichtungsenergie auf die rheologischen Eigenschaften des Betons durchführen. Die hierbei gewonnenen Informationen sollen dazu dienen das Frischbetonverhalten der Fahrbahnbetone für die Bewertung der Einbautauglichkeit mit dem Fertiger zu bewerten (vgl. Abschnitt B1).

Des Weiteren wird im Verbundvorhaben mittels eines neuartigen innovativen Antriebsstrang eine rheologiegestützte Mischprozessführung umzusetzen, indem das verlustarme Verhalten eines stufenlos regelbaren Direktantriebs genutzt wird und über eine drehmoment- bzw. eine drohmomentgestützte Betriebsweise der Mischerwellen einerseits eine rasche Stabilisationszeit des Mischvorgangs erzielt wird und andererseits anhand eines angepassten Mess-Regelregimes im Laufe des Mischprozesses versucht werden soll, die für das Frischbetonverhalten charakteristischen Kenngrößen der Fließgrenze und der Viskosität zumindest qualitativ zu bestimmen, um eine bessere rheologische Beschreibung des steifen Betons zu erhalten als dies derzeit mit dem Verdichtungsversuch möglich ist. Gelingt es, die für die Einbaufähigkeit des Fahrbahnbetons erforderliche Konsistenz reproduzierbar während des Mischvorgangs bestimmen zu können, wäre eine wichtige Voraussetzung geschaffen, ein Kriterium zu schaffen, das ZUM Mischende erlaubt, zuverlässig und wiederkehrend die erforderliche Einbaukonsistenz für den Fertiger noch im Mischer zu bestimmen, um bei Unter- bzw. Überschreitungen des Toleranzbereiches der Zielkonsistenz, noch mit Nachsteuerungen den Frischbeton in den Zielkorridor zu führen.

Eine weitere für den Fahrbahnbeton wichtige Kenngröße stellt die Bestimmung des Luftporengehalt des Frischbetons dar. Auch hierzu wurde mit der Beschaffung des Air-Void-Analyzers (AVA) [Grove et al. 2006], [Liu et al. 2015] ein interessantes Laboranalysegerät beschafft, das erlaubt, Aussagen zum Mikroluftporengehalt am Frischbeton zu bestimmen. Im Rahmen des Vorhabens konnte ein parallel entwickeltes und in der Patentierung befindliches für den Baustelleneinsatz taugliches Luftporenmesssystem [Bottke 2021] eingesetzt werden, das zur Luftporencharakterisierung der in AP B1 mit der realmaßtäblichen Mischanlage hergestellten Fahrbahnbetonrezepturen zum Einsatz kam und sehr gute Erkenntnisse zum Mikroluftporengehalt geben kann.

5.2.1 A2.1 - Bewertung der Festbetoneigenschaften bisher im Betonfahrbahnbau eingesetzter Betone

In den ZTV Beton-StB 07 sind detaillierte Regelungen und Hinweise für die Ausführung und Abnahme der Bauleistung enthalten. So wird z.B. für die Abnahme des fertigen Fahrbahndeckenbetons als Festbetoneigenschaft nur die Druckfestigkeit gefordert. Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau "ARS 21/2010" wurde durch das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung die "Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO Beton 09)" eingeführt. Dadurch konnten alternativ zu den standardisierten Bauweisen nach den "Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)" unbewehrte Betonbefestigungen rechnerisch dimensioniert werden. Bei der Dimensionierung nach RDO Beton stellt als Festbetoneigenschaft die Spaltzugfestigkeit eine zentrale Eingangsgröße dar. Diese wird gemäß TP B-StB an einer Bohrkernscheibe (Durchmesser 100 mm, Höhe 50 mm) bestimmt, welche die separate Prüfung an der oberen und unteren Randfaser des fertigen Fahrbahndeckenbetons ermöglicht. Die Spaltzugfestigkeit dient folglich als Abnahmekriterium für die fertige Leistung, wenn die Betonbefestigung nach RDO Beton dimensioniert wurde, im Gegensatz zu der im Rahmen von Kontrollprüfungen ermittelten Druckfestigkeit.

Alle Festbetoneigenschaften werden von der Zusammensetzung der Matrix und dabei maßgebend vom Zementsteinporenraum, d.h. insbesondere vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad bestimmt. Beim Einsatz einer rheologiegestützten Mischprozessführung im Straßenbau wird angenommen, dass sich ein vollständiger Aufschluss aller im Gemisch enthaltenen Fein(st)stoffe wie auch eine Homogenisierung aller Ausgangsstoffkomponenten erzielen lässt. Dadurch wird vor allem die Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix verbessert, welche sich positiv auf die Festbetoneigenschaften auswirken sollte.

Zum Nachweis der Verbesserungen, die sich aus einer optimalen Mischprozessführung und dem Betoneinbau ergeben sollen, müssen jedoch zunächst die Einflüsse auf die Festbetoneigenschaften bei einer konventionellen Mischprozessführung und dem Betoneinbau bekannt sein. Hierzu reichen allein die Bestimmung der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit nicht aus. Erstens, die Druckfestigkeit des Betons hängt vor allem vom Wasserzementwert, vom Hydratationsgrad sowie von der Zementart, Zusatzstoffen und u. U. Zusatzmitteln und damit von der Betonzusammensetzung und von den Erhärtungsbedingungen ab. Die Eigenschaften der Gesteinskörnung sind beim Normalbeton eher von untergeordneter Bedeutung. Zweitens, die Spaltzugfestigkeit wird an der fertiggestellten Fahrbahndecke nur an der Randfaser ermittelt. Die Randfaser allein sagt aber über die Qualität des Betons über die gesamte Deckendicke bzw. der Verbundfestigkeit zwischen Ober- und Unterbeton nichts aus. Daher werden die zentrische Zugfestigkeit wie auch der statische Elastizitätsmodul zur Beurteilung der Qualität mit einbezogen.

Nachfolgend wird die Bestimmung der Festbetoneigenschaften (Elastizitätsmodul, Spaltzugfestigkeit, Druckfestigkeit und zentrische Zugfestigkeit) beschrieben, wie sie dann später an Prüfkörpern aus vier exemplarischen Baustellen durchgeführt wurden.

Statischer Elastizitätsmodul (E-Modul):

Die Gewinnung von Prüfkörpern erfolgte an Betonbohrkernen (Durchmesser 360 mm), die ursprünglich aus Betonplatten stammen (vgl. Abbildung 5-144). Die Betonbohrkerne wurden zunächst längs zur Fahrtrichtung halbiert. Aus den beiden so erhaltenen Halbschalen wurden, wenn möglich, Prüfkörper mit den Abmessungen 10 x 10 x 20 cm³ längs zur Fahrbahnoberfläche (horizontale Richtung) aus dem oberen, mittleren und unteren Drittel herausgearbeitet.

Für die spätere Belastung im Druckversuch (zur Ermittlung des statischen E-Moduls) wurden die Stirnseiten aller Prüfkörper planparallel geschliffen. Aufgrund einer Vielzahl von Untersuchungen an Betonprobekörpern

aus Fahrbahndeckenbetonen und den sehr guten Erfahrungswerten bezüglich Prüfstreuungen, wurde die Ermittlung des statischen E-Moduls nach DIN 1048-5:1991-06 und nicht nach der seit Juni 2014 eingeführten DIN EN 12390-13:2014-06 durchgeführt. Der statische E-Modul wurde nach zweimaliger Be- und Entlastung als Sekantenmodul zwischen den Spannungswerten 0,5 MPa und 10 MPa bestimmt. Die Erfassung der Dehnung erfolgte an zwei gegenüberliegenden Messstrecken mit induktiven Messwertaufnehmern über eine Messlänge von 100 mm. Die induktiven Messwertaufnehmer waren an den seitlichen Flächen der Prüfkörper angebracht. Anzumerken ist, dass bei den Prüfkörpern die in horizontaler Richtung herausgearbeitet wurden, eine der zwei Messtrecken in Richtung der Fahrbahnoberfläche angebracht wurde.

Für die Bestimmung des E-Moduls an Bohrkernen wurden die Stirnseiten planparallel geschliffen und in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06 nach zweimaliger Be- und Entlastung als Sekantenmodul zwischen den Spannungswerten 0,5 MPa und 10 MPa bestimmt. Die Erfassung der Dehnung erfolgte mit drei gleichmäßig angebrachten Messstrecken mit induktiven Messwertaufnehmern über eine Länge von 100 mm.

Spaltzug- und Druckfestigkeit:

Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgte nach der Technischen Prüfvorschrift TP B-StB Teil 3.1.05 "Spaltzugfestigkeit von Beton", Ausgabe 2016. Die Prüfkörper wurden entweder aus den Betonbohrkernen am oberen und unteren Rand (z. B. Abbildung 5-148), über die Bohrkernhöhe verteilt (Abbildung 5-146) oder aus ausgewählten Bereichen gewonnen (Abbildung 5-155). An verbleibenden Reststücken wurden, wenn möglich, die Betondruckfestigkeit ermittelt (z. B. Abbildung 5-148). Im Rahmen der Prüfkörpervorbereitung wurden aus diesem Reststück Prüfzylinder mit einem Verhältnis von Länge/Durchmesser = 1 gesägt und die Druckflächen planparallel geschliffen. Die Prüfung erfolgte nach DIN EN 12390-3:2019-10 mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,6 MPa/s.

Zentrische Zugfestigkeit:

Nach der Bestimmung der Spaltzugfestigkeit an der oberen und unteren Randfaser (Abbildung 5-192) oder des E-Moduls (Abbildung 5-199), wurde an verbleibenden Reststücken die zentrische Zugfestigkeit bestimmt. Die zentrische Zugfestigkeit ist die von einer axial auf Zug beanspruchten Probe maximal aufnehmbare mittlere Zugspannung. Die Zugkraft wurde über Stahlplatten in die Probe eingeleitet. Hierfür wurden die Stahlplatten mit einem Epoxidharz auf die Endflächen der Proben geklebt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,05 N/mm²·s.

Tabelle 5.13: Auszug aus den Mischungsberechnungen der vier exemplarisch untersuchten Baustellen und unter Angabe der Bauweise (einschichtig/einlagig und zweischichtig)

	Köln-Wahn Flughafen	In-Wahn Flughafen BAB A1 Wittlich – Salmtal		BAB A1 Salı	mtal – Wittlich	BAB A14 AS Leipzig – AD Schkeuditz	
	emsementig/emagig	OB	UB	OB	UB	OB	UB
GK 0/2	Wesseling-Berzdorf	PI	aidt	-	-	Lö	beritz
GK 0/4	-		-	Ban	demer	-	-
GK 2/8	Basalt Hühnerberg	Basalt	Bolsdorf	-	-	Rhyolit	h Löbejün
GK 5/8		-		Basalt Bolsdorf		-	-
GK 8/16 GK 16/22	Basalt Hühnerberg	-	Basalt Bolsdorf	-	Basalt Bolsdorf	-	Rhyolith Löbejün -
GK 16/32	-	-	-	-	-	-	Rhyolith Löbejün
Volumen GK [dm³/m³]	681 - 696	616	689	620	685	640	709
Zement [kg/m³]	350 bzw. 360	420	350	420	350	420	340
w/z _(eq.)	0,40	0,43	0,41	0,43	0,43	0,42	0,41
LP [%]	5,0	6,5	5,0	6,0	5,0	4,5	4,0

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Festbetoneigenschaften vier exemplarischer Baustellen aufgeführt, wobei sich die Baustellen in der Bauweise (einschichtig/einlagig und zweischichtig) als auch in den Betonausgangsstoffen und der Betonzusammensetzung unterscheiden (Tabelle 5.13).

Bei der ersten Baustelle, Flughafen Köln-Wahn, wurden zwei Betonplatten aus einem Bereich entnommen, der später wieder zurückgebaut wurde. Aus diesem Grund wurde in diesem Bereich der Nachbehandlung der Oberfläche wenig Beachtung geschenkt. Zudem handelt es sich um einen Bereich, bei dem der Gleitschalungsfertiger mit dem Betoneinbau startete und vermutlich noch nicht die Einbauqualität aufweisen konnte, als wenn kontinuierlich eingebaut wird. Die folgende Abbildung 5-144 zeigt die beiden Betonplatten.



Abbildung 5-144: Teilstücke aus der Fahrbahndecke des Bauvorhabens Flughafen Köln-Wahn mit bereits entnommenen Prüfkörpern zur Weiterverarbeitung. Nachträglich wurden aus der Platte A und B nochmals zusätzlich Bohrkerne entnommen (BK A17-24 und BKA17-24)

In Abbildung 5-145 wurde der statische E-Modul über der Druckfestigkeit aufgetragen. Der E-Modul wurde an Prismen bestimmt, die aus dem oberen, mittleren und unteren Drittel der Fahrbahndecke stammen. Auf den ersten Blick liegen alle Ergebnisse der Platte A als auch der Platte B in sehr engen Grenzen (Abbildung 5-146).

Die Fehler, die bei der Ermittlung des statischen E-Moduls auftreten können, sind von der Last- und Verformungsmessung abhängig. Durch die Wahl einer Druckprüfmaschine der Klasse 1 ist gewährleistet, dass der Fehler des jeweiligen Anzeigewertes im Anwendungsbereich nicht größer als ± 1 % ist. Der Fehler wird im Wesentlichen von der Verformungsmessung bestimmt. Diese ist überwiegend von den Stoff- und Gefügeeigenschaften des Betons abhängig. Daher sind Streuungen an sonst gleichen Prüfkörpern in der Größenordnung von rd. ± 10 % möglich. Abweichungen in der Größenordnung ≤ 15 % sind auf den Streubereich von Labormessungen zurückzuführen.



Abbildung 5-145: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit, ermittelt an Prüfkörpern, die längs zur Oberfläche und über die Dicke verteilt, aus der Betonplatte A und B gewonnen wurden.



Abbildung 5-146: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Prüfkörpern, die längs zur Oberfläche und über die Dicke verteilt, aus der Betonplatte A und B gewonnen wurden.

Folgt man den Ausführungen, so wird deutlich, dass die Variationskoeffizienten in den Grenzen zwischen 4,1 und 7,2 Prozent auf eine gute Beton- und Einbauqualität hindeuten. Das lässt auch die Mantelfläche des Bohrkerns in Abbildung 5-147 vermuten. An allen Manteloberflächen war ein Basalt als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. Größere Gesteinskörner wären überwiegend gleichmäßig über die Länge der Bohrkerne verteilt. Das Größtkorn betrug 22 mm. Das Betongefüge war dicht und fest.



Abbildung 5-147: Mantelflächen von Bohrkernen die aus der Platte A (Nr. 1-8) und B (Nr. 1-8) gewonnen wurden, sowie , exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (f_{ct,sp}).

In Tabelle 5.14 sind die Ergebnisse aus der Spaltzugprüfung unter Angabe von Position (vgl. Abbildung 5-147), Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der geprüften Prüfkörper für die Platten A (Nr. 1-8, Abbildung 5-144 links) und B (Nr. 1-8, Abbildung 5-144 rechts) aufgetragen. Dabei reichen die Variationskoeffizienten in der Platte A von 3,3 bis 15,1 % und in Platte B von 7,7 bis 12,6 % in Abhängigkeit der Position. Es ist bekannt, dass bei einer hochwertigen, gleichmäßigen Betonherstellung und einem qualitätsgerechten Einbau der Variationskoeffizient einen Wert von 10 % nicht überschreitet.

In Anbetracht dessen, ist der Variationskoeffizient von 15,1 % ein deutlicher Hinweis auf eine schlechte Nachbehandlung der Oberfläche, die zum Teil auch in Abbildung 5-144 (links) sichtbar ist. Ansonsten liegen die Variationskoeffizienten unter 10 %, was wie erwähnt für eine hochwertige und gleichmäßige Betonherstellung spricht. Im Gegensatz dazu liegen die Variationskoeffizienten bei Platte B bis auf zwei Ausnahmen über 10 %. Das deutet auf Probleme bei der Betonherstellung und/oder des Einbaus hin.

Tabelle 5.14: Auswertung der Spaltzugprüfung unter Angabe von Position, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper für die Platte A (Nr. 1-8, Abbildung 5-148 links) und B (Nr. 1-8, Abbildung 5-148 rechts).

		Plat	te A		Platte B				
Position	MW	Stabw.	Var.	Ν	MW	Stabw.	Var.	Ν	
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	
1	3,7	0,56	15,1	8	4,1	0,46	11,2	8	
2	4,6	0,33	7,2	8	4,2	0,53	12,6	8	
3	4,4	0,39	8,9	8	4,4	0,34	7,7	8	
4	4,3	0,37	8,6	8	4,5	0,49	10,9	8	
5	4,0	0,25	6,3	8	4,1	0,38	9,3	8	
6	3,8	0,31	8,2	8	4,4	0,47	10,7	8	
7	4,0	0,13	3,3	7	4,2	0,47	11,2	8	
Gesamt	4,1	0,46	11,2	55	4,3	0,48	11,2	56	



Abbildung 5-148: Mantelfläche eines Bohrkernes aus Platte A sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (f_{ct.sp}), des statischen Elastizitätsmoduls (E_c) und der Druckfestigkeit (f_c) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung (Pfeile).

In Abbildung 5-152 wurde der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit aufgetragen. Der E-Modul wurde an Bohrkernen bestimmt die aus der Platte A (Nr. 9-16, Abbildung 5-144 links) und B (Nr. 9-16, Abbildung 5-144 rechts) gewonnen wurden. Alle Ergebnisse liegen in sehr engen Grenzen (Var. = 4,6 %). Das deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Gesteinskörnung über die Bohrkernhöhe hin.



Abbildung 5-149: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die senkrecht zur Oberfläche aus der Betonplatte A (Nr. 9-16, Abbildung 4.148 links) und B (Nr. 9-16, Abbildung 5.148 rechts) gewonnen wurden.



Abbildung 5-150: Mantelfläche eines Bohrkernes aus Platte A sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (f_{ct.sp}), der zentrischen Zugfestigkeit (f_{ct}) und der Druckfestigkeit (f_c) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung (Pfeile).

In Abbildung 5-152 ist die Zugfestigkeit über die Druckfestigkeit aufgetragen. Die Zugfestigkeit wurde an Bohrkernen bestimmt die aus der Platte A (BK A17-24) und B (BK B17-24) gewonnen wurden. Die Zugfestigkeit unterliegt für Platte A (7,1 %) und Platte B (9,9 %) geringen Streuungen. Die geringste Zugfestigkeit wurde bei Platte A zu 2,1 MPa und bei Platte B zu 2,4 MPa bestimmt. Die Anforderung an die Verbundfestigkeit f_v von 1,56 MPa, ermittelt nach DIN EN 13877-2:2013-06, wurde in jedem Fall erfüllt.

In Abbildung 5-152 ist die Spaltzugfestigkeit, ermittelt an der oberen und unteren Randfaser, jeweils für Platte A (BK A17-24) und B (BK B17-24) zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass in dem geprüften Bereich die Streuungen der Spaltzugfestigkeit unter 10 % liegen.



Abbildung 5-151: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die senkrecht zur Oberfläche aus der Betonplatte A (BK A17-24) und B (BK B17-24) gewonnen wurden.



Abbildung 5-152: Abhängigkeit zwischen Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernscheiben der oberen und unteren Randfaser aus Bohrkernen der Betonplatte A (BK A17-24) und B (BK B17-24).

Bei der zweiten Baustelle, Wittlich - Salmtal BAB A1, wurden ebenfalls zwei Betonplatten aus einem Bereich entnommen, der später wieder zurückgebaut wurde. Auch bei dieser Baumaßnahme wurde in diesem Bereich der Nachbehandlung der Oberfläche wenig Beachtung geschenkt. Zudem handelt es sich um einen Bereich, bei dem der Gleitschalungsfertiger mit dem Betoneinbau startete. Die folgende Abbildung 5-153 zeigt die beiden Betonplatten C und D.



Abbildung 5-153: Teilstücke aus der Fahrbahndecke des Bauvorhabens Wittlich - Salmtal mit bereits entnommenen Prüfkörpern zur Weiterverarbeitung.

Die Abbildung 5-155 zeigt die Mantelflächen von Bohrkernen, die entweder aus der Platte C oder D stammen. An der Mantelfläche war ein Basalt als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. An der Mantelfläche des Bohrkerns aus Platte C ist zu erkennen, dass die grobe Gesteinskörnung im Oberbeton gleichmäßig verteilt ist. Im Unterbeton ist diese nicht mehr gleichmäßig verteilt. Unter dem Oberbeton schließt sich zunächst ein sehr zementsteinreicher Bereich an. Eine grobe Gesteinskörnung ist so gut wie nicht zu erkennen. Daran anschließend sind grobe Gesteinskörner bis 8 und 22 mm ungleichmäßig verteilt. An der Mantelfläche des Bohrkerns D ist anhand der Verteilung der Gesteinskörnung bis 8 mm zu erkennen, dass fast über die gesamte Bohrkernhöhe ein Beton eingebaut wurde, der eigentlich für den Oberbeton gedacht war.

In Abbildung 5-154 wurde der statische E-Modul über der Druckfestigkeit aufgetragen. Der E-Modul wurde an Prismen bestimmt, welche aus dem oberen und unteren Drittel der Fahrbahndecke stammen. Die Streuungen, ermittelt an Prismen aus dem unteren Drittel lagen über 5 % und die des oberen Drittel unter 5 % (Abbildung 5-154).



Abbildung 5-154: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Prüfkörpern, die längs zur Oberfläche aus dem Oberbeton und dem Unterbeton der Betonplatten C und D gewonnen wurden.



Abbildung 5-155: Mantelflächen von Bohrkernen die aus der Platte C und D gewonnen wurden, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (fct,sp).

In der Tabelle 5.15 sind die Ergebnisse der Spaltzugprüfung zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Platte C im zementsteinreichen Bereich (Position Mitte) die höchste Spaltzugfestigkeit im Gegensatz zu den Positionen oben und unten ermittelt wurde. Trotz der offensichtlichen Probleme beim Einbau liegen die Prüfstreuungen für die einzelnen Ebenen (oben, Mitte, unten) unter 10 %. Bei Platte D sind die Spaltzugwerte und die Prüfstreuungen im Bereich Mitte und unten nahezu identisch. Der obere Bereich weist die geringste Spaltzugfestigkeit bei Prüfstreuungen > 10 % auf.

Tabelle 5.15: Auswertung der Spaltzugprüfung unter Angabe von Position, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n) für die Platten C und D.

		Plat	te C	Platte D				
Position	MW	Stabw.	Stabw. Var.		MW	Stabw.	Var.	n
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]
oben	4,1	0,39	9,5	10	3,8	0,40	10,5	9
Mitte	5,6	0,51	9,1	10	4,4	0,42	9,5	9
unten	3,9	0,29	7,4	10	4,7	0,44	9,4	9

Bei der dritten Baustelle, Salmtal - Wittlich BAB A1, wurden 15 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm im Standstreifen und gleichmäßig verteilt auf 7 km Streckenlänge entnommen. Die Abbildung 5-157 zeigt die Bohrkernentnahme im Standstreifen (links) sowie einen entnommenen Bohrkern bei km 115+500 (rechts).



Abbildung 5-156: Baumaßnahme Salmtal - Wittlich BAB A1, Bohrkernentnahme im Standstreifen (links) und entnommener Bohrkern bei km 115+500 (rechts).

Die Abbildung 5-158 zeigt die Mantelfläche eines Bohrkerns. An der Manteloberfläche war ein Basalt als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. Größere Gesteinskörner wären sowohl im Ober- als auch im Unterbeton überwiegend gleichmäßig verteilt. Das Größtkorn im Oberbeton betrug 8 mm und im Unterbeton 22 mm. Das Betongefüge war dicht und fest.



Abbildung 5-157: Mantelfläche eines Bohrkerns, welcher aus der Fahrbahndecke der Baumaßnahme A1 gewonnen wurde, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls (E_c), der zentrischen Zugfestigkeit (f_{ct}) und der Druckfestigkeit (f_c) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung im Versuch (Pfeile).

In Abbildung 5-158 wurde der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit aufgetragen. Der E-Modul wurde an Bohrkernen bestimmt. Alle Ergebnisse liegen in sehr engen Grenzen (Var. = 3,8 %). Das deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Gesteinskörnung hin.

In Abbildung 5-159 ist die Zugfestigkeit über die Druckfestigkeit aufgetragen. Die Zugfestigkeit unterliegt geringen Streuungen (6,4 %), wobei der Bruch im Zugversuch bis auf eine Ausnahme ausschließlich im Unterbeton aufgetreten ist. Der Minimalwert wurde zu 2,1 MPa und der Maximalwert zu 2,8 MPa bestimmt. Die Anforderung an die Verbundfestigkeit f_v von 1,56 MPa, ermittelt nach DIN EN 13877-2:2013-06, wurde in jedem Fall erfüllt.


Abbildung 5-158: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 7 km Streckenlänge entnommen wurden.



Abbildung 5-159: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 7 km Streckenlänge entnommen wurden.

Bei der vierten Baustelle, AS Leipzig – AD Schkeuditz BAB A14, wurden 18 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm im Standstreifen und gleichmäßig verteilt auf 8 km Streckenlänge entnommen. Das 8 km lange Streckenlos war in drei Bauabschnitte aufgeteilt. Die Abbildung 5-160 zeigt den Bauanfang des Streckenloses (links) sowie einen entnommenen Bohrkern im Standstreifen bei km 87+000 (Plattennummer 0001).



Abbildung 5-160: Baumaßnahme AS Leipzig – AD Schkeuditz BAB A14, Beginn des Streckenloses bei km 87+000 (links) und dazugehöriger Bohrkern bei Plattennummer 0001.

Die Abbildung 5-161 zeigt die Mantelfläche eines Bohrkerns der Baumaßnahme. An der Manteloberfläche war ein Rhyolith als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. Größere Gesteinskörner waren sowohl im Ober- als auch im Unterbeton überwiegend gleichmäßig verteilt. Das Größtkorn im Oberbeton betrug 8 mm und im Unterbeton 32 mm. Das Betongefüge war dicht und fest.



Abbildung 5-161: Mantelfläche eines Bohrkerns, welcher aus der Fahrbahndecke der Baumaßnahme A14 gewonnen wurde, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (f_{ct,sp}), des statischen Elastizitätsmoduls (E_c), der zentrischen Zugfestigkeit (f_{ct}) und der Druckfestigkeit (f_c) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung im Versuch (Pfeile).

In Abbildung 5-162 wurde der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit aufgetragen. Der E-Modul wurde an Bohrkernen bestimmt. Alle Ergebnisse liegen in sehr engen Grenzen (Var. = 3,8 %). Das deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Gesteinskörnung hin.

In Abbildung 5-163 ist die Zugfestigkeit über die Druckfestigkeit aufgetragen. Die Zugfestigkeit unterliegt großen Streuungen (> 10 %), wobei der Bruch im Zugversuch sowohl im Ober- und Unterbeton als auch im Verbund zwischen Ober- und Unterbeton aufgetreten ist. Das Minimum der Zugfestigkeit wurde zu 1,5 MPa und das Maximum zu 2,7 MPa bestimmt. Die Anforderung an die Verbundfestigkeit f_v von 1,56 MPa, ermittelt nach DIN EN 13877-2:2013-06, wurde in einem Fall nicht erfüllt.



Abbildung 5-162: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 8 km Streckenlänge entnommen wurden.



Abbildung 5-163: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 8 km Streckenlänge entnommen wurden.

Tabelle 5.16 zeigt die Auswertung der Spaltzugprüfung für Ober- und Unterbeton getrennt nach den drei Bauabschnitten. Bis auf eine Ausnahme (3. Bauabschnitt Oberbeton) liegen die Streuungen unter 10 %. In diesen Bereichen ist von einer hochwertig und gleichmäßig hergestellten Betonfahrbahndecke auszugehen.

 Tabelle 5.16: Auswertung der Spaltzugpr
 üfung f
 ür Ober- und Unterbeton unter Angabe des Bauabschnitts, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Pr
 üfkörper.

	1. Baua	bschnitt	2. Baua	bschnitt	3. Baua	bschnitt
	OB	UB	OB	UB	OB	UB
MW [MPa]	4,6	5,2	4,4	5,5	4,7	5,2
Stabw. [MPa]	0,44	0,34	0,28	0,50	0,61	0,43
Var. [%]	9,6	6,5	6,4	9,1	13,0	8,3
n [-]	6	6	4	5	5	6

Die vier exemplarisch untersuchten Baustellen lassen bisher folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Ergebnisse zu den Festbetoneigenschaften (statischer Elastizitätsmodul, Spaltzugfestigkeit und zentrische Zugfestigkeit) von fertiggestellten Betonfahrbahndecken lassen erkennen, dass schon heute bei einer konventionellen Mischprozessführung und gekoppelt mit einem qualitätsgerechten Einbau, die Herstellung einer hochwertigen und gleichmäßig hergestellten Betonfahrbahndecke möglich ist.
- Bei einer hochwertigen und gleichmäßig hergestellten Betonfahrbahndecke sollten die Streuungen des statischen E-Moduls ≤ 5 % sowie die der Spaltzugfestigkeit und der zentrischen Zugfestigkeit ≤ 10 % betragen.

5.2.2 A2.2 - Bewertung der Frischbetoneigenschaften bisher im Betonfahrbahnbau eingesetzter Betone

Im Zusammenhang mit der Bewertung bisheriger Betone wird zunächst auf Möglichkeiten, Herausforderungen und neue Entwicklungen im Bereich der Frischbetonmesstechnik und Laboruntersuchungen eingegangen. Im Anschluss wird der Erstarrungsvorgang des Betons und hinsichtlich Temperatur-, E-Modul-, und Wellenverlauf näher betrachtet sowie anhand von Baustellen- und Labormessungen auf Unterschiede in den Betonrezepturen eingegangen.

5.2.2.1 Frischbetonmesswerte & -verfahren

Im Rahmen der Analyse der Herstellungsprozesskette wurden parallel Untersuchungsreihen zur Analyse und Charakterisierung der Frischbetone, je nach Baustelle entweder am Mischer oder am Fertiger, vorgenommen. Dabei wurden in möglichst gleichen Zeitabständen an jedem Begehungstag die folgenden Frischbetonkennwerte bestimmt:

- LP-Gehalt
- Rohdichte
- Verdichtungsmaß
- Betontemperatur
- Wassergehalt des Betongemisches (mehrere Male gemeinsam mit der Eigenüberwachung

Die auf der Baustelle gewonnenen Versuchsergebnisse wurden später am IWB ausgewertet.

<u>LP-Gehalt</u>

Bei der Bestimmung der LP-Gehalte zeigte sich deutlich, dass bei den untersuchten Fahrbahnbetonen die mit dem LP-Topf bestimmten Luftporengehalte sehr starken Abweichungen vom Soll-Wert unterliegen. Zudem wurde im Zuge der Untersuchungen deutlich, dass große Diskrepanzen zwischen Ist- und Soll-LP-Gehalten nicht nur während eines Einbautags, sondern teilweise sogar bei mehreren dicht aufeinander folgenden Messungen auch innerhalb einer Stunde aufgetreten sind.

Doch konnte keine eindeutige Korrelation zwischen LP-Gehalt und Tageszeit beobachtet werden. Festgestellt wurde aber, dass die Fertigkeiten des Baustoffprüfers und der technische Zustand der Prüfgeräte einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Neben vorhandenen Betonresten im LP-Topf und bereits länger abgelaufenen Prüfplaketten wurde auch mehrmals eine fehlende Kalibrierung der LP-Töpfe bis hin zu sogar einer klar erkennbaren Undichtheit des LP-Topfs vorgefunden. Selbst in den Fällen, in denen eine häufige Kalibrierung sowohl am LP-Topf des IWB als auch am LP-Topf der Eigenüberwachungsstelle erfolgte, um eine gleiche Messbasis zu schaffen, musste festgestellt werden, dass es zu Abweichungen des LP-Gehalts bei der Bestimmung der gleichen entnommenen Frischbetonprobe gekommen ist. Allerdings war diese weniger stark ausgeprägt als in den Untersuchungen, in denen keine Kalibration der Eigenüberwachungsstelle erfolgte.

Des Weiteren konnte ein erheblicher Einfluss der Prüfzeit auf den mit dem LP-Topf gemessenen LP-Gehalt beobachtet werden. Anhand zahlreicher Versuche an der gleichen Betoncharge wurde ersichtlich, dass eine Wartezeit des Prüfstarts von wenigen Minuten gegenüber des Messbeginns unmittelbar nach dem Druckaufbau in überwiegender Zahl zu einem anderen LP-Gehalt führt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich der Druckausgleich in Abhängigkeit des definierten Prüfvolumens des LP-Topfs in den unterschiedlich großen Porenräumen des Frischbetons einen gewissen zeitlichen Bedarf erfordert, ist zu erwarten, dass mit einer sofortigen Messung nur ein Teil der Porenräume komprimiert werden konnten. Daher wird davon ausgegangen, dass ein verzögerter Prüfbeginn zu einer genaueren Angabe des LP-Gehaltes führt.

Wassergehalt des Frischbetons

Der Wassergehalt des Frischbetons wurde mittels Darrversuch gemäß den Richtlinien täglich einmal durch die Eigenüberwachung und zusätzlich mehrmals vom IWB bestimmt. Eine kontinuierliche Kontrolle der seitens der Bauunternehmung in der Regel relativ zeitnah nach Einbaubeginn erfassten Frischbetonfeuchte konnte auf keiner Baustelle verzeichnet werden. In den Untersuchungen zeigte sich, dass der am Mischer ermittelte Darrwert inklusive der Korrektur mit der materialspezifischen und der w/z-wirksamen Wasseraufnahme einer jeden Kornfraktion in der über-wiegenden Zahl der Messungen deutlich höhere Werte aufwies, als bei der Erstprüfung als Soll-Wassergehalt definiert wurde. Die zusätzlich am Fertiger erfassten Darrwerte (frei gewählte Baustelle) sind wegen ihrer fehlenden Validität nicht weiter ausgewertet worden. Am Untersuchungstag herrschten sehr windige Umgebungsbedingungen an den Begehungstagen vor, so dass infolge der Probemasseverluste zu einer erheblichen Überschreitung der Soll-Wassergehalte führ-te. Aus diesem Grund wurden am Mischer weitere Darrversuche durchgeführt, allerdings mit einem zuvor gewählten zeitlichen Versatz, um die Transportdauer des Frischbetons vom Mischer zum Fertiger zu simulieren. Hierbei zeigte sich aber, dass der bei den hochsommerlichen Umgebungsbedingungen berechnete Darrwert den Soll-Wassergehalt fortlaufend unterschritten hat. Eine eindeutige Aussage zum tatsächlichen Ist-Wassergehalt im Frischbeton konnte mit der Wassergehaltsbestimmung mittels Darrversuch auf keiner Baustelle getroffen werden. Die Ermittlung des Wassergehalts mittels Darrversuchs zeigte daher deutlich, dass die mit diesem Prüfverfahren abgeleiteten Messergebnisse nicht nur erheblich von der zeitlichen Entnahme und der Güte der Frischbetonprobe, sondern auch von den Umgebungsbedingungen abhängt. Die Bestimmung des Wassergehalts mit dem Darrversuch wird zudem signifikant von der Handhabe der Versuchsdurch-führung und den Erfahrungen des Baustoffprüfers beeinflusst.

Bestimmung des Verdichtungsmaßes

Wird die Frischbetonkonsistenz mit dem Verdichtungsversuch bestimmt, kommt der Handhabe und der Erfahrung des Baustoffprüfers auf der Baustelle ein entscheidender Einfluss auf die Qualität der erzielten Messergebnisse zu. So wurde auf einer der frei gewählten Baustellen festgestellt, dass die Aussagen zum Verdichtungsmaß große Abweichungen zwischen dem Eigen- und Fremd-überwacher trotz gleichzeitiger Probenahme derselben Betoncharge große Unterschiede aufwiesen. Als Ursache hierfür konnte festgestellt werden, dass der Fremdüberwacher die Vorverdichtung des Probematerials während des Transports der Frischbetonprobe über stark unebenes Gelände nicht berücksichtigt hat. Des Weiteren konnte auf nahezu jeder Baustelle ein rasches Ansteifen des Frischbetons mit sicht- und messbaren Veränderungen der Konsistenz innerhalb eines kurzen Zeitraums beobachtet werden. Dies wurde auf den erhöhten Feinanteil der Gesteinskörnungen zurückgeführt. Aus diesem Grund sollte eine Anpassung der Erstprüfung hinsichtlich der Verwendung von praxisnaher, nicht entstaubter Gesteinskörnung in Betracht gezogen werden.

Bestimmung der Frischbetontemperatur

Die Untersuchungen zur Frischbetontemperatur wiesen keine Besonderheiten auf, da deren Entwicklung mit der Umgebungstemperatur korrelierte.

Bestimmung der Frischbetonrohdichte

Die unter Verwendung des konventionellen LP-Topfs berechnete Rohdichte führte baustellenunabhängig ebenfalls zu großen Schwankungen im Verlauf eines Einbautags. Bei genauerer Betrachtung der Frischbetonkennwerte ist jedoch aufgefallen, dass keine eindeutige Korrelation zwischen LP-Gehalt und Frischbetonrohdichte gegeben war. In der Regel sollte – bei Annahme eines nahezu konstanten Feststoffgehalts oder Wassergehalts (im Rahmen der Genauigkeit des Wiegesystems) und bei gleichem Volumen – die Rohdichte bei steigendem LP-Gehalt sinken, da mehr Luft und somit entweder weniger Feststoffe oder weniger Wasser im System gegeben ist. Doch zeigte sich, dass bei fast identischen oder bei geringfügig abweichenden LP-Gehalten häufig größere Unter-schiede in der Rohdichte gemessen wurden. Daher wurde angenommen, dass die Hauptursache für diese Differenzen auf starke Ungenauigkeiten des Wassergehalts im Stoffraum (in Abhängigkeit der Exaktheit der gemessenen LP-Gehalte) zurückzuführen ist. Diese Aussage lässt sich untermauern, wenn die Auswirkungen der auf den Baustellen immer angetroffenen unzureichend kalibrier-ten oder sogar deaktivierten Feuchtemesssonden berücksichtigt werden. Ferner sind deutliche Schwankungen der Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Rohdichte sowie fehlerhafte Einwaagen der Gesteinskörnungen und/oder Vermischungen mit anderen Ausgangsstoffen mögliche Ursachen dafür, dass die vorgenannten Aspekte einen erheblichen Einfluss auf den Stoffraum und die Rohdichte der Frischbetone haben.

Die im Rahmen der Analyse der Herstellungsprozesskette parallel am Frischbeton durchgeführten Untersuchungen am Frischbeton haben je nach Baustelle entweder am Mischer oder am Fertiger stattgefunden. Dabei wurden in ähnlichen Zeitabständen an jedem Begehungstag die Frischbetonkennwerte LP-Gehalt, Rohdichte, Verdichtungsmaß, Betontemperatur sowie über mehrere Male der Wassergehalt wie zuvor aufgezeigt zusammen mit der jeweiligen Eigenüberwachung aufgenommen und später am IWB ausgewertet. Dabei zeigte sich deutlich, dass vor allem der LP-Gehalt sehr starken Abweichungen vom jeweiligen Soll-Wert unterliegt. Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass solch große Diskrepanzen vom Soll-LP-Gehalt nicht nur während eines Einbautags (vgl. Abbildung 5-165), sondern teilweise sogar bei mehreren Messungen innerhalb einer Stunde (vgl. Abbildung 5-166) aufgetreten sind. Eine eindeutige Korrelation zwischen LP-Gehalt und Tageszeit konnte daher nicht beobachtet werden, jedoch ein erheblicher Einfluss der Fertigkeiten des Baustoffprüfers und des Zustands der Prüfgeräte auf das Messergebnis. Neben vorhandenen Betonresten im LP-Topf und bereits länger abgelaufenen Prüfplaketten konnte auch mehrmals eine fehlende Kalibrierung der LP-Töpfe bis hin zu sogar einer klar erkennbaren Undichtheit des LP-Topfs vorgefunden werden. Obwohl häufig Kalibrierungen des IWB-LP-Topfs und des Baustellen-LP-Topfs zur Schaffung einer gleichen Messbasis durchgeführt wurden, ist es zu Abweichungen des LP-Gehalts bei derselben Frischbetonprobe gekommen, wenn auch nicht so stark ausgeprägt wie ohne eine Kalibrierung. Des Weiteren konnte ein Einfluss der Prüfzeit auf den LP-Gehalt beobachtet werden. Aus Versuchen an derselben Betoncharge wurde ersichtlich, dass eine Wartezeit des Prüfstarts von wenigen Minuten gegenüber des Messbeginns direkt nach Druckaufbau überwiegend zu anderen LP-Gehalten geführt hat. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich der Druckausgleich in Abhängigkeit des definierten Prüfvolumens des LP-Topfs nur sehr langsam vollzieht und somit bei einer sofortigen Messung nur der obere Bereich des Frischbetons erfasst wird, ist davon auszugehen, dass ein verzögerter Prüfbeginn zu genaueren LP-Gehalten führt.



Abbildung 5-164: Extremwerte des LP-Gehalts für ausgewählte Einbautage



Abbildung 5-165: Abweichung des LP-Gehalts bei selber Betoncharge und unterschiedlichen Prüfern

Diese Beobachtung konnte am IWB empirisch bestätigt werden. Es zeigte sich in Laborversuchen [Scheurer 2019] mit zahlreichen, sich im Prüfvolumen unterscheidender LP-Töpfe, dass die in der Praxis eingesetzten LP-

Töpfe (Druckausgleichsverfahren) aufgrund ihrer technischen respektive physikalischen Rahmenbedingungen sowie des einheitlich gewählten Messzeitpunkts "sofort" unzureichende und somit fehlerhafte Messwerte einer Betonprobe ergeben. In der Abbildung 5-167 und der Abbildung 5-168 sind exemplarisch die Messfehler bzw. der nicht erfasste Porenanteil für LP-Töpfe nach dem Druckausgleichsverfahren mit einem Fassungsvermögen von 5 Liter und 8 Liter dargestellt. Abbildung 5-169 zeigt im Vergleich die Ergebnisse mit dem Wassersäulenverfahren derselben Versuche wie mit dem Druckausgleichsverfahren. Die eingetragene "O-Linie" entspricht dabei dem Soll-LP-Wert in Abhängigkeit der Soll-Frischbetonrohdichte gemäß der Betonrezeptur bzw. dem Ist-LP-Wert in Abhängigkeit der Ist-Frischbetonrohdichte, da die Rohdichten der Ausgangsstoffe zuvor in Laborversuchen exakt ermittelt worden sind. Zudem ist das Messprozedere hervorzuheben, welches in eine Hauptmessung und drei Wiederholungsprüfungen untergliedert wurde, um zusätzlich die Reproduzierbarkeit der Messwertgüte des jeweiligen LP-Topfs mit zunehmenden Prüfungshäufigkeit zu quantifizieren. Hintergrund hierzu war der Gedankengang, dass sich bei einem dauerhaft geschlossenen LP-Topf und lediglich dem Ablasen des Drucks sowie einem erneuten Auffüllen mit Wasser, zwar minimal die Frischbetonrohdichte ändert, aber der Ist-LP-Gehalt nahezu identisch zu den vorherigen Prüfungen sein sollte.



Abbildung 5-166: Messfehler LP-Töpfe 5 Liter (Druckausgleichverfahren)



Abbildung 5-167: Messfehler LP-Töpfe 8 Liter (Druckausgleichverfahren)



Abbildung 5-168: Messfehler LP-Töpfe 6 Liter (Wassersäulenverfahren)

Die mittleren Messfehler der Prüfgeräte per Druckausgleichverfahren befanden sich alle im Bereich von -1,0 % zu wenig erfassten Luftporen. Die mittleren Messfehler der Prüfgeräte per Wassersäulenverfahren lagen im

direkten Vergleich bei ungefähr -0,2 %. Besonders auffällig ist, dass der Messfehler beim Druckausgleichsverfahren mit zunehmender Wiederholungsprüfung teilweise stark abgenommen hat, trotz einer für jede Messung ermittelte und nahezu identisch gebliebene Frischbetonrohdichte. Die Prüfungen mit dem Wassersäulenverfahren zeigten dagegen ein weitgehend konstantes Messverhalten. Obwohl diese Problematik besonderer Aufmerksamkeit bedarf und weiter intensiv und umfangreich eruiert werden muss, haben die ersten Untersuchungen bereits eingehend gezeigt, dass sich mit dem Wassersäulenverfahren deutlich genauere Ergebnisse erzielen lassen.

Bestimmung des Wassergehalts gemäß Richtlinien

Der Wassergehalt des Frischbetons wurde mittels Darrversuch gemäß den Richtlinien täglich einmal durch die Eigenüberwachung und zusätzlich mehrmals vom IWB bestimmt. Eine kontinuierliche Kontrolle der seitens der Bauunternehmen in der Regel relativ zeitnah nach Einbaubeginn erfassten Frischbetonfeuchte konnte auf keiner Baustelle verzeichnet werden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass der am Mischer ermittelte Darrwert inklusive der Korrektur mit der materialspezifischen und der w/z-wirksamen Wasseraufnahme jeder Kornfraktion überwiegend deutlich höher als der in der Erstprüfung definierte Soll-Wassergehalt war. Die zusätzlich am Fertiger erfassten Darrwerte (frei gewählte Baustelle) sind wegen ihrer fehlenden Validität nicht weiter ausgewertet worden, da die windigen Umgebungsbedingungen an den Begehungstagen und einem infolgedessen einhergegangen Probenmaterialverlust zu einer erheblichen Überschreitung des Soll-Wassergehalts geführt haben. Deswegen wurden am Mischer weitere Darrversuche durchgeführt, allerdings mit einem zuvor gewählten zeitlichen Versatz, um die Transportdauer des Frischbetons vom Mischer zum Fertiger zu simulieren. Hier ergab sich jedoch, dass der bei den hochsommerlichen Umgebungsbedingungen berechnete Darrwert den Soll-Wassergehalt fortlaufend unterschritten hat. Eine eindeutige Aussage zum tatsächlichen Ist-Wassergehalt im Frischbeton konnte mit dieser Prüfmethode auf keiner Baustelle getroffen werden. Die Ermittlung des Wassergehalts anhand des Darrversuchs zeigte daher deutlich, dass das aus diesem Prüfverfahren abgeleitete Messergebnis nicht nur erheblich von der zeitlichen Probenahme und der Güte der Frischbetonprobe sowie den Umgebungsbedingungen abhängt, sondern u.a. auch signifikant von der Ausführung und der Erfahrung des Baustoffprüfers beeinflusst wird.

Aus diesen Gründen sollte in Zukunft der Fokus auf den Einsatz von mobiler Feuchtemesstechnik gelegt werden. Zwar besteht nach wie vor intensiver Untersuchungsbedarf, besonders eine korrekte Handhabung und Kalibrierung sind einer der Haupteinflussfaktoren für eine hohe Messgüte, aber verschiedene Versuche zeigten bereits vielversprechende Resultate und das Potential einer zügigen sowie zielführenden Wassergehaltsbestimmung des Frischbetons als auch der Gesteinskörnung. Vor allem der zeitliche Faktor spielt eine entscheidende Rolle bei der Anstrengung eines gleichbleibenden Wassergehalts im Frischbeton und einer der daraus ableitenden zeitnahen Anpassung der Wasserdosierung.

Obwohl mit dem Darrversuch bei idealen Rahmenbedingungen zuverlässige Messwerte zu generieren sind, ist durch die enorm lange Abkühlphase von mehreren Stunden die notwendige Flexibilität für eine erforderliche rasche Dosieranpassung nicht gewährleistet. Gerade bei der Abkühlphase konnte bei diversen Baustellebegehungen festgestellt werden, dass Baustoffprüfer an teilweise noch sehr heißen Darrproben den w/z-Werte bestimmt haben, welche von den zusätzlichen, an der vollständig erkalteten Darrproben ermittelten w/z-Werte folglich abgewichen sind und somit auch nicht valide waren.

Baustellenanalysen zum Verichtungsmaß

Beim Verdichtungsversuch zur Bestimmung der Konsistenz des Frischbetons konnte ebenfalls ein starker Einfluss der Fertigkeiten respektive der Durchführung durch den Baustoffprüfer auf die Qualität der Messergebnisse beobachtet werden. Auf einer frei gewählten Baustelle ergaben sich so zwischen Eigen- und Fremdüberwacher trotz gleichzeitiger Probenahme aus derselben Betoncharge große Unterschiede (vgl. Abbildung 4.211). Als Ursache hierfür konnte festgestellt werden, dass der Fremdüberwacher die Vorverdichtung des Probematerials während des Transports der Frischbetonprobe über stark unebenes Gelände nicht berücksichtigt hat. Zusätzlich zeigte sich auf jeder Baustelle der Einsatz eines anderen Rütteltisches sowie divergierende Verdichtungszeiten für die Ermittlung von Frischbetonkennwerten und der Herstellung von Festbetonprobekörpern trotz gleicher Konsistenz und Charge. Ein zielführender Lösungsansatz wären hier Rütteltische, welche die reale Verdichtungsleistung eines Gleitschalungsfertigers im Labormaßstab simulieren können. Zudem sollten womöglich in Abhängigkeit der Konsistenz respektive Konsistenzklasse durch Eruierung einheitliche Verdichtungszeiten definiert werden. Des Weiteren konnte auf nahezu jeder Baustelle eine rasches Ansteifen des Frischbetons mit sicht- und messbaren Veränderungen der Konsistenz innerhalb eines kurzen Zeitraums beobachtet werden (vgl. Abbildung 5-170), was mit großer Wahrscheinlichkeit auf den erhöhten Feinanteil in den Gesteinskörnungen zurückzuführen ist. Aus diesem Grund sollte eine praxisnahe Erstprüfung hinsichtlich der Verwendung von nicht entstaubter Gesteinskörnung (d.h. wie sie aus dem Steinbrauch angeliefert wird) in Betracht gezogen werden.



Abbildung 5-169: Abweichung des Verdichtungsmaßes bei selben Betoncharge und unterschiedlichen Prüfern



Abbildung 5-170: Änderung der Konsistenzklasse einer Frischbetonprobe innerhalb von 15 Minuten

Die Untersuchungen zur Frischbetontemperatur wiesen keine Besonderheiten auf, da deren Entwicklung mit der Umgebungstemperatur korrelierte.

Die unter Verwendung des konventionellen LP-Topfs berechnete Rohdichte ergab baustellenunabhängig ebenfalls hohe Schwankungen im Verlauf eines Einbautags. Bei genauerer Betrachtung der Frischbetonkennwerte ist jedoch aufgefallen, dass keine eindeutige Korrelation zwischen LP-Gehalt und Frischbetonrohdichte gegeben war. In der Regel sollte – bei Annahme eines nahezu konstanten Feststoffgehalts oder Wassergehalts (im Rahmen der Genauigkeit des Wiegesystems) und bei gleichem Volumen – die Rohdichte bei steigendem LP-Gehalt sinken, da mehr Luft und somit entweder weniger Feststoffe oder Wasser im System ist. Es zeigte sich allerdings, dass bei fast identischen oder geringfügig abweichenden LP-Gehalten dennoch häufig größere Unterschiede in der Rohdichte vorhanden waren. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Hauptursache für diese Differenzen auf starke Ungenauigkeiten des Wassergehalts im Stoffraum (in Abhängigkeit der Exaktheit der gemessenen LP-Gehalte) zurückzuführen ist. Diese Aussage kann durch die annähernd immer angetroffenen unzureichend kalibrierten oder sogar deaktivierten Feuchtemesssonden weiter bekräftigt werden. Ferner sind deutliche Schwankungen der Gesteinskörnungen als Naturerzeugnis hinsichtlich ihrer Rohdichte sowie fehlerhafter Einwaagen der Gesteinskörnungen und/oder anderen Ausgangsstoffen möglich, jedoch würden sich diese Faktoren wahrscheinlich mit einem erheblich höheren Einfluss auf den Stoffraum und die Rohdichte bemerkbar machen.

5.2.2.2 Analyse und Nachbildung des Aushärtevorgangs

Zur Bewertung der Frischbetoneigenschaften wurden seitens der MPA Versuchsreihen mit Zement und Beton während der Erstarrung und Erhärtung mit den Ultraschall-Messsystemen FreshCon und SolidCheck/Beus vorgenommen. Die Mssungen diesten auch der Verifizierung der Vergleichbarkeit der Messungen mit den Messgeräten BEUS und FreshCon. Zeitgleich wurde die Ausbildung der Primärwelle und Sekundärwelle im FreshCon untersucht, um daraus den E-Modul als wichtigen Parameter zu berechnen. Weiter wurde die thermische Signatur während dieser Phase in einem adiabaten Messgefäß sowie in der FreshCon-Probe aufgenommen. Zur Untersuchung der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wurden die FreshCon-Messungen in einem Klimaschrank bei unterschiedlichem Klima durchgeführt. Diese Messungen werden zur Unterstützung der Modellbildung der Erstarrungsphase für einen idealen Fahrbahnbeton mit dem ISYS ausgetauscht. Dieses wird anhand eines thermodynamischen Modells unter dem Einfluss von praktisch ermittelten Messreihen an das Materialmodell iterativ angepasst. Hierzu findet die Anpassung des Materialmodells zur Berücksichtigung der Messergebnisse aus einem nicht idealem Kalorimeter auf Basis des Temperaturmodells aus Abschnitt 7.1.1.2 statt.

Der Vergleich von Theorie und Messwerten liefert grundsätzlich übereinstimmende Ergebnisse. Die Temperaturversuche der adiabatischen Messung laufen autark (ohne direkten Einfluss eines Klimaschranks) und sind wichtig für die Materialmodellierung. Parallel werden Messungen an der Betonprobe selbst innerhalb des künstlichen Klimas vorgenommen, um Daten über die Temperaturentwicklungsdifferenz der Adiabaten und Nichtadiabaten zu sammeln. Des Weiteren wird durch die Ultraschalllaufzeiten die dynamische E-Modulentwicklung berechnet, welche unter Variation des Umgebungsklimas innerhalb eines geschlossenen Gerätekreislaufs in stationären Bedingungen stattfindet. Grundlage dafür ist die Laufzeitmessung der Primär- und Scherwellen im zeitlichen Abstand von 5 Minuten über eine Messzeit von 3 Tagen während der Erhärtungsphase des Betons.

Parallel zu den Versuchen wurde auch eine Vorortmessung an Testbaustelle in Köln/Wahn durchgeführt. Am 28.06. wurde der Beton, welcher direkt aus der Mischanlage kam, in die verschiedenen Messgeräte eingebaut. Es wurde über einen Zeitraum von 28 Stunden gemessen. Die Messungen wurden in einem Container, welcher den täglichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt war, untergebracht. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit lag bei 60 %.



Abbildung 5-171: Temperaturverlauf der Vorortmessung Köln-Wahn

In Abbildung 5-171 werden die Temperaturen der Vorortmessung in Köln-Wahn dargestellt. Um einen genauen Vergleich der Reaktionen zwischen der Vorort- und den Labormessungen vornehmen zu können, wurde der rechnerisch ermittelte Mittelwert der adiabatischen Labormessungen ebenfalls der Abbildung beigefügt. Anhand diesem kann beobachtet werden, dass beide Reaktionen mit etwa derselben Temperatur beginnen. Die Ruhephase der Mittelwertkurve der Labormessungen zeigt im Gegensatz zur Vorortmessung einen leichten Anstieg und somit eine kleine Zunahme der Reaktionen an. Bei der Vorortmessung ist bis zur vierten Stunde kaum eine Reaktion sichtbar. Dies könnte durch den Einsatz von Verzögerern begründet sein. Die Ruhephase endet bei der Labormessung nach der dritten und bei der Vorortmessung erst nach der vierten bis fünften Stunde. Danach intensiviert sich die Reaktion der Vorortmessung stärker als die der Labormessungen, sodass ein Schnittpunkt beider Temperaturkurven nach knapp zehn Stunden bei 35 °C stattfindet. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Labormessungen nimmt bereits nach neun Stunden langsam ab und erreicht nach 18 Stunden eine maximale Temperatur von 40,7 °C. Die Kurve der Vorortmessung hingegen steigt weiterhin an, nimmt erst nach der zehnten Stunde etwas ab und erreicht ebenfalls nach 18 Stunden Messzeit eine Höchsttemperatur von 45,5 °C. Somit kann abschließend, anhand der Temperatur, gesagt werden, dass die Mischung der Vorortmessung Verzögerer und andere Zusatzstoffe beinhaltet. Dies ist durch eine deutlich reaktionsärmere Ruhephase sowie eine intensivierte Akzelerationsphase begründet.



Abbildung 5-172: Verlauf der Wellengeschwindigkeiten der Vorortmessung in Köln-Wahn



Abbildung 5-173: Verlauf Dynamischer E-Modul der Vorortmessung in Köln-Wahn

Im Folgenden wird der Reaktionsverlauf der Vorortmessung anhand der Geschwindigkeitswerte der P- und S-Welle beschrieben. Wie dem Verlauf der Sekundärwelle in Abbildung 5 173 entnommen werden kann, steigt diese erst nach 3,5 Stunden. Die P-Welle (siehe Abbildung 5 173) hingegen zeigt einen leichten Anstieg der Geschwindigkeit nach bereits 2,5 Stunden Messzeit an. Somit endet die Ruheperiode nach ca. drei Stunden. Nun kommt es in der Akzelerationsperiode zu einer intensiven Hydratation, dies wird durch die Erhöhung der Wellengeschwindigkeiten deutlich. Die Reaktionsintensivität endet etwa nach zehn Stunden, somit kling die Akzelerationsperiode langsam und eine vollständige Erstarrung ist nach zwölf Stunden erreicht. In den nächsten Stunden steigt die Wellengeschwindigkeit beider Kurven nur noch sehr langsam. Dadurch wird das Erhärten des Betons signalisiert. Das nun in Lösung aufgegangene Dicalciumsilikat reagiert mit dem vorhandenen Wasser und schließt noch offene Poren. Die Dezelerationsperiode geht über die Messdauer der Messung hinaus.

Im Anschluss an die oben genannten Vorversuche und die Messungen in Köln/Wahn wurden weitere Versuchsreichen unter Variation von Klima und Luftfeuchte durchgeführt. Die Rezeptur des dabei verwendeten Betons ist in Tabelle 5.17 dargestellt.

Bezeichnung	Anteil [%]	Menge [kg]
Sand 0/2	30,00	10,71
WiBo 2/5	7,50	2,68
WiBo 5/8	7,50	2,68
WiBo 8/11	12,50	4,46
WiBo 11/16	12,50	4,46
WiBo 16/22	30,00	10,71
CEM I 32,5 N	-	7,2
Wasser	-	3,24

Tabelle 5.17: Rezeptur der Betonmischung

Es wurden 21 Messungen in sieben verschiedenen Klimaverhältnissen durchgeführt. Dabei waren die jeweiligen Abläufe der Messungen identisch. Messung 22 war eine Widerholungsmessung für Klima 2. Die Gesteinskörnung wurde gemischt und in den Klimaschrank zur Trocknung eingebaut. Nach der Abkühlphase wurde sie direkt aus dem Klimaschrank in die ca. 150 m entfernte Mischhalle gebracht. Dort wurden, während des Mischvorgangs Zement und Wasser der Gesteinskörnung zugegeben, um die Betonrezeptur zu vervollständigen. Anschließend wurde der Mischer gereinigt und die fertige Betonmischung, nach ca. 25 – 30 Minuten, in das FreshCon, das Kalorimeter und das SolidCheck eingebaut. Im Klimaschrank waren die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit bereits voreingestellt. Für jedes Klima wurden drei Messungen durchgeführt. In Tabelle 5.18 sind die verschiedenen Details aller Messungen beschrieben.

Bei jeder Messung mittels FreshCon und BEUS wurde auch eine Kalorimeter-Messung durchgeführt. Aus diesen Messungen wurden die Durchschnitte und die Standartabweichungen berechnet und in der Abbildung 5-174 graphisch dargestellt. Die Werte der jeweiligen Messungen können dem Anhang entnommen werden. Da dies ein adiabatischer, exothermer Prozess ist, d.h. die Temperatur wurde nur durch die chemischen Reaktionen der Hydratation verändert, bietet sich die Beschreibung des Hydratationsverlaufs anhand der Kalorimeter-Messungen an. Für die Reaktionen während der Hydratation von Portlandzement, sind die vier folgenden Klinkerphasen verantwortlich. Zusätzlich finden sich auch andere Stoffe wie Magnesium in sehr kleinen Mengen vor.

Messung	Klima	Temperatur	Rel. Luftfeucht.	Messzeit
M1	Klima 1	20 °C	65 %	72 h
M2	Klima 1	20 °C	65 %	72 h
M3	Klima 1	20 °C	65 %	72 h
M4	Klima 2	10 °C	65 %	72 h
M5	Klima 2	10 °C	65 %	72 h
M6	Klima 2	10 °C	65 %	70 h
Köln Wahn	-	28 °C	60 %	28 h
M7	Klima 3	30 °C	65 %	72 h
M8	Klima 3	30 °C	65 %	72 h
M9	Klima 3	30 °C	65 %	70 h
M10	Klima 4	20 °C	85 %	72 h
M11	Klima 4	20 °C	85 %	70 h
M12	Klima 4	20 °C	85 %	72 h
M13	Klima 5	20 °C	35 %	72 h
M14	Klima 5	20 °C	35 %	72 h
M15	Klima 5	20 °C	35 %	70 h
M16	Klima 6	10 °C	85 %	71 h
M17	Klima 6	10 °C	85 %	70 h
M18	Klima 6	10 °C	85 %	69 h
M19	Klima 7	30 °C	35 %	72 h
M20	Klima 7	30 °C	35 %	70 h
M21	Klima 7	30 °C	35 %	70 h
M22	Klima 2	10 °C	65 %	70 h

Tabelle 5.18: Übersicht der Details aller 22 Messungen

Tabelle 5.19: Klinkerphasen

Klinkerphase	Bezeichnung	Symbol	Geschätzter Anteil [%]
Alit	Tricalciumsilikat	C3S	62
Belit	Dicalciumsilikat	C2S	16
Aluminatphase	Tricalciumaluminat	C3A	11
Ferritphase	Calciumaluminatferrit	C2 (A,F)	9

Die Klinkerphasen haben unterschiedliche Eigenschaften. Alit ist für die Frühfestigkeit des Betons zuständig, geht schnell in Lösung und reagiert schneller zu Calciumsilikathydrat (C-S-H). Dabei wird viel Wärme frei. Belit

ist für die Spätfestigkeit des Betons verantwortlich. Diese Reaktion beginnt erst nach ca. 12 h. Die Wärmeentwicklung dieser Klinkerphase ist geringer als beim Alit. Die Ferrit- und Aluminatphase reagieren sofort nach Zugabe des Wassers und sorgen für einen raschen Temperaturanstieg zu Beginn.



Abbildung 5-174: Kalorimeter-Messungen Durchschnitt Temperaturverlauf

Direkt nach Zugabe des Wassers, beginnt der Hydratationsprozess mit der Induktionsperiode. Das Tricalciumaluminat und das Ferritaluminat sind sehr reaktionsfreudige Klinkerphasen und reagieren umgehend beim Kontakt mit Wasser. Zudem gehen Ionen in Lösung und die rasche Reaktion des Tricalciumaluminat auf der Oberfläche der Klinkerpartikel mit dem Anmachwasser sorgt für einen Anstieg der Temperatur. Dies ist durch einen leichten Anstieg des Graphen zu Beginn der Messungen in der Abbildung 5-157 dargestellt. Da die Oberflächen der Klinker nun mit Reaktionsprodukten bedeckt sind, klingt die Reaktion ab und die Ruheperiode beginnt. Ein weiteres Indiz für den Beginn der nächsten Periode ist die abflachende Temperaturkurve. In dieser Periode gehen die Ionen weiter in Lösung auf. Die Reaktion des Tricalciumaluminat und der damit einhergehende Temperaturanstieg verringern sich. In dieser Phase ist der Beton noch gut zu verarbeiten. Der eigentliche Erstarrungsprozess beginnt etwa nach einer Stunde mit der Reaktion des Tricalciumsilikat. Die Reaktion der Alit-Phase läuft erst langsam ab, nimmt aber im späteren Verlauf der Hydratation deutlich zu. Durch die Menge des Alit, wird die Frühfestigkeit bestimmt. Ab etwa der vierten Stunde ist wieder ein starker Anstieg der Temperaturkurve zu verzeichnen. Dies deutet auf eine Intensivierung des Hydratationsprozesses und dem Beginn der Akzelerationsperiode, der Hauptreaktionsperiode, an. In dieser Periode kommt es durch die starke Reaktion des Tricalciumsilikat zur Bildung großer und langkettiger Calciumsilikathydrate. Da das Alit Hauptbestandteil der Klinkerphasen ist und die Reaktion ein exothermer Prozess ist, steigt die Temperatur dementsprechend stark an. Nach etwa 12 Stunden ist ein leichtes Abflachen in der Kurve zu sehen. Die Temperatur steigt langsamer. Grund hierfür ist der Rückgang der Reaktion des Tricalciumsilikat. Die Zwischenräume der Partikel sind nun fast alle geschlossen. Parallel beginnt jetzt die Reaktion des Dicalciumsilikat mit dem Wasser. Damit enden die Erstarrung und die Akzelerationsperiode langsam und läuten die Dezelerationsperiode ein. In dieser Periode erhärtet der Beton, indem die noch vorhandenen Poren der Klinker durch nadelförmige Reaktionen des Belit geschlossen werden. Dabei wird nicht viel Wärme frei und die Temperatur der Hydratation nimmt ab der 17 Stunde ab. Die Finalperiode beschreibt die den letzten Schritt des Hydratationsprozesses und ist für die Auswertung dieser Arbeit nicht von Bedeutung.

Die Messungen unter Klima 1 (siehe Abbildung 5-175) wurden bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % durchgeführt. Da die Steigungen der Kurven bereits nach 15 Stunden wieder abflachen, liegt der für diese Ausarbeitung entscheidende Zeitraum der Messungen zwischen 0 und 18 Stunden. Somit werden im folgenden Text hauptsächlich die Reaktionen in diesen Zeitintervallen beschrieben. Die Diagramme der kompletten Messungen können dem Anhang entnommen werden.



Abbildung 5-175: Wellengeschwindigkeit unter Klima 1 (20°C, 65% rel.F.) (Ausschnitt 0-36 h)

Die Abweichungen der jeweiligen Messungen sind unter Klima 1 relativ gering. Dennoch gibt es größere Unterschiede bei der Primär- als bei der Sekundärwelle. Wie den Diagrammen der Abbildung 5-175 und Abbildung 5-176 entnommen werden kann, breitet sich die Primärwelle schneller aus. Von Anbeginn der Messungen steigt sie stetig an, beschleunigt ab der dritten Stunde und flacht ab der sechsten Stunde ab.



Abbildung 5-176: Wellengeschwindigkeit unter Klima 1 (20°C, 65% rel.F.) (Ausschnitt 0-36 h)

Ein stetiger Anstieg der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist auf eine Reaktion der Klinkerphasen mit dem zugegebenen Wasser und der damit einhergehenden Verdickung und letztendlichen Erstarrung des Zementleims zurückzuführen. Je dickflüssiger und fester ein Stoff wird, desto schneller werden Longitudinalwellen in diesem übertragen. Nach der 15. Stunde überschreitet sie eine Wellengeschwindigkeit von 4000 m/s. Somit ist der Erstarrungsvorgang fast abgeschlossen und die Dezelerationsperiode und die damit einhergehende Erhärtung beginnen.

Die Scherwelle hingegen, weist ab der zweiten Stunde einen Anstieg auf und damit das Ende der Ruheperiode. Da Transversalwellenübertragung nur in festen Körpern übertragen werden können, bedeutet dies, dass die Klinkerteilchen nun aufgebrochen sind und die eigentliche Erstarrung und Hydratation beginnt. Ein weiteres Indiz für den Beginn der Akzelerationsperiode ist eine Erhöhung der gemessenen Temperatur ab der vierten Stunde. Eine erhöhte Temperatur ist auf einen Anstieg der Reaktion des Tricalciumaluminat und Tricalciumsilikat zurückzuführen. Die Bildung erster Calciumsilikathydrate setzt in der Regel ein oder zwei Stunden nach Beginn der Hydratation ein. Diese Reaktionen und der Anstieg der Kurve halten sich bis zur 13. Stunde relativ konstant und flachen dann stark ab. Somit endet die Erstarrung und die Erhärtung beginnt. Ab der 15 Stunde wird die Wellengeschwindigkeit von 2000 m/s überschritten. Bei der dritten Messung ist nach ca. fünf Stunden ein Sprung der S-Welle zu beobachten. Dieser ist auf den Auswertungsalgorithmus der Rohdaten mit der Smartpic-Software zurückzuführen.

Anhand der Ergebnisse beider Wellenformen wurde der dynamische E-Modul mittels folgender Formeln berechnet und in der Abbildung 5-178 dargestellt. Nach etwa zwei Stunden kommt es zum Anstieg der Kurve, zur ersten Bildung der Calciumsilikathydrate (C-S-H) und zum langsamen Beginn der Erstarrung. Ab der vierten Stunde endet die Ruheperiode und leitet die Akzelerationsperiode ein. Wie der steigenden Kurve und auch dem erhöhten verlauf der Temperatur entnommen werden kann, wird der Hydratationsprozess intensiviert und die Bildung eines Gefüges aus C-S-H Faserbüscheln und C-S-H-Blattstrukturen beginnt. Ab der 15. Stunde kann ein Abflachen der Kurve beobachtet werden, die Dezelerationsperiode wird eingeleitet. Mit dem Ende der Akzelerationsperiode ist die Erstarrung vollzogen und die Erhärtung des Betons beginnt. Durch Bildung kleiner C-S-H-Nadeln, in den noch vorhandenen Poren, schließen sich diese. Der Festigkeitsverlauf nimmt zu und der Beton erhärtet langsam. Diese Periode dauert die gesamte Messungszeit über an. Die Normaldauer der Dezelerationsperiode beträgt 72 Stunden.



Abbildung 5-177: Dynamischer E-Modul unter Klima 1 (20°C, 65% rel.F.) (Ausschnitt 0-36 h)

In Abbildung 5-179 sind ergänzend die Temperaturverläufe unter Klima 1 dargestellt.



Abbildung 5-178: Temperaturverläufe unter Klima 1 (20°C, 65% rel.F.) (Ausschnitt 0-36 h)



Abbildung 5-179: Übersicht der Primärwellen aller Messungen

In Abbildung 5-180 und Abbildung 5-181 sind die Primär- und Sekundärwellen aller Messungen abgebildet. Wie den Abbildungen entnommen werden kann, ist der Unterschied der einzelnen Wellen zueinander bei den Sekundärwellen um einiges ausgeprägter als bei den Primärwellen. Das unterschiedliche Klima nimmt zwar Einfluss auf den Erhärtungsverlauf, da aber die Reibverluste bei Druckwellen durch die Ausbreitungsart sehr gering sind, wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Primärwelle kaum vom Klima beeinflusst.



Abbildung 5-180: Übersicht der Sekundärwellen aller Messungen

Die Sekundärwellen hingegen, brauchen eine gewisse Festigkeit, um die Schwingungen übertragen zu können. Sie können zwar durch die schon vorhandene Gesteinskörnung bereits von Beginn an Scherkräfte übertragen, diese werden aber durch die noch zähflüssige und nicht erstarrte Mischung abgeschwächt. Bei der Scherwelle wird durch die senkrechte Bewegung der Atome zur Ausbreitungsrichtung die Schwingung nur weitergegeben, wenn zwischen den Atomen eine starke Verbindung herrscht. Somit werden Primärwellen weniger als Sekundärwellen vom Erhärtungsverlauf beeinflusst und demnach hat die Sekundärwelle eine stärkere Aussagekraft.

Zum selben Ergebnis kommt man auch bei der Betrachtung der Wendepunkte beider Wellentypen. Zur Bestimmung der Wendepunkte wurde der Bereich der Akzelerationsperiode eingegrenzt und mit einer Funktion dritten Grades dargestellt. Mit Hilfe der ersten Ableitung konnte im nächsten Schritt die Position des Wendepunkts graphisch ermittelt werden. So wurden die zeitlich dazugehörigen Temperaturen der Proben ausgelesen und den Diagrammen eingebunden. In Abbildung 5-182 sind die Wendepunkte der Primärwelle und in Abbildung 5-183 die der Sekundärwelle abgebildet. Wie man diesen beiden Abbildungen entnehmen kann, werden die Wendepunkte der Primärwellen schneller erreicht. Die Streuung der Primärwelle ist bei kalten Klimaverhältnissen kleiner als die der Sekundärwelle. Der Wendepunkt der Primärwelle wird bei kalten Klimata zwischen zweieinhalb und fünf Stunden erreicht. Zum Erreichen des Wendepunkts der Sekundärwelle hingegen, werden bei kalten Klimaverhältnissen zwischen fünf und zehn Stunden benötigt. Somit ist nicht nur die Zeit, sondern auch das Zeitfenster zum Erreichen des Wendepunkts der Akzelerationsperiode bei der Primärwelle deutlich kleiner. Auffällig ist auch die Abnahme des Streufelds über die Zeit bei einem Wellentyp. So liegt der Betrag der Zeitunterschiede der Primärwelle bei 10 °C um zweieinhalb Stunden, bei 20 °C um eineinhalb Stunden und bei 30 °C lediglich bei einer halben Stunde. Das Streufeld der Sekundärwelle hingegen liegt bei kalten Klimaverhältnissen bei fünf Stunden, nimmt aber bei normalen und warmen Klimaten auf eineinhalb Stunden ab. Generell werden die Wendepunkte bei allen gemessenen Klimaverhältnissen bei der Primärwelle schneller erreicht. Die Streuung beider Wellen nehmen mit wärmerem Klima ab. Des Weiteren sind die zeitlichen Unterschiede der einzelnen Klimata bei der Sekundärwelle deutlich ausgeprägter als bei der Primärwelle. Somit werden Entwicklungsunterschiede der Wellengeschwindigkeiten, welche durch die Reaktionen der Hydratation bedingt sind, von der Sekundärwelle aussagekräftiger dargestellt.



Abbildung 5-181: Wendepunkte der Primärwellen



Abbildung 5-182: Wendepunkte der Sekundärwellen

Die Erfassung der Referenzdaten für die Ultraschalluntersuchungen der aktuell im Fahrbahnbau verwendeten Betone erfolgte zu einem späteren Projektzeitpunkt, da die Teststrecke zum damaligen Bearbeitungsstand noch nicht realisiert werden konnte und die notwendige Messtechnik zuvor noch entwickelt werden musste. Bis zur Realisierung der Demonstrationsstrecken sollte ein modifiziertes Ultraschallsystemen aus den beiden Verfahren "BEUS" und "FreshCon" entwickelt werden, um das Erstarrungsverhalten und die frühe Festigkeitsentwicklung unter Variation der äußeren Bedingungen analysieren und bewerten zu können.

6 ARBEITSSCHWERPUNKT B – SCHLÜSSELINNOVATIONEN FÜR PROZESSSICHERE TEILSCHRITTE

6.1 ARBEITSPAKET B1 – RHEOLOGIE-GESTÜTZTE MISCHPROZESSFÜHRUNG

Mit Blick auf eine qualitativ hochwertige Herstellung der feinstoffreichen, wasserarmen und mit Fließmitteln und Luftporenbildnern herzustellenden Fahrbahnbetone ist eine rheologiegestützte Mischprozessführung anzustreben, da diese eine gezielte und eine über die Mischdauer hinweg veränderliche Mischqualität und an die Konsistenz anpassbare Energiezuführung ermöglicht. Aktuelle Forschungen können belegen, dass mit zweistufigen Mischvorgängen und auch mit zweigestufter Fließmittelzugabe selbst komplexe Betongemische nach kurzer Mischdauer und mit geringem Energieeinsatz hergestellt werden können und der Frischbeton sich dabei durch eine hohe Gleichförmigkeit und Robustheit auszeichnet. Das Arbeitspaket B1 befasst sich folglich mit den technologischen Möglichkeiten, den Frischbeton bereits im Mischer auf sein rheologisches Verhalten hin charakterisieren zu können, um so das Mischende zuverlässig feststellen zu können. Neben der Suche einer abhängig des Mischsystems optimalen Werkzeuggeometrie sind methodische Vorgehensweisen und Anpassungen der Getriebeeinheiten zu entwickeln und zu erproben, mit denen der Fahrbahnbeton durch einen drehmomentgeführten Betrieb zielführend der gewünschten Frischbetonqualität zugeführt werden kann. Hierfür wird parallel im Labormaßstab ein neuer Mischer entwickelt und kontinuierlich auf die erlangten Erkenntnisse angepasst.

Auch gilt es, die Mischungszusammensetzung hinsichtlich ihrer Partikelzusammensetzung mit Blick auf die Packungsdichte zu optimieren. Die im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse sollen auf den Technikumsmaßstab übertragen werden und an Fahrbahnbetonen erprobt werden. Anschließend wird ein realmaßstäbliches Mischsystem mit dem modifizierten Antriebsstrang ausgerüstet, um die rheologiegestützte Herstellung von Fahrbahnbetonen im Großtechnikum zu erproben.

6.1.1 B1.1 - Verbesserung der stofflichen Voraussetzungen

Fahrbahnbetone werden hinsichtlich ihrer festen Ausgangsstoffe aus den Hauptkomponenten Zement, Wasser und Gesteinskörnungen hergestellt. Als flüssige Komponenten finden neben Wasser Betonzusatzmittel Verwendung. Hierbei handelt es sich vor allem um Luftporenbildner wie auch um Fließmittel. Letztere können zur Konsistenzeinstellung und zur Konsistenzhaltung eingesetzt werden.

Um eine Rezepturoptimierung vorzunehmen, sollte im Verbundvorhaben untersucht werden, ob durch einen verstärkten Einsatz von Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln eine bessere Konsistenzhaltung wie auch eine bessere Verdichtbarkeit mit dem Gleitschalungsfertiger realisiert werden kann.

6.1.1.1 Anforderungen an Fahrbahnbetone

Nach ZTV-Beton-StB 07 soll der Oberbeton für Fahrbahnen der Festigkeitsklasse C30/37 und ist so in seiner Zusammensetzung festzulegen, dass er den Anforderungen der Expositionsklasse XF4 genügt. Zudem wird ein w/z-Wert von maximal 0,45 gefordert. Auch die in Fahrbahnbetonen ein-setzbaren Zemente sind in der TL Beton-StB festgelegt. Schon heute finden kaum mehr Portland-zemente CEM I 32,5 R Verwendung, meist nur dann, wenn eine schnelle Anfangsfestigkeit erreicht werden soll. Vielmehr kommen Portlandzemente CEM I 42,5 N bei normalen Anforderungen an die Anfangsfestigkeit und Zemente CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T und CEM/A-LL in den Festigkeitsklassen 32 R oder 42,5 N zum Einsatz. Ebenso finden CEMM III/A mi maximal 50 % Hüttensand und einer Festigkeitsklasse von 42,5 Verwendung.

Grundsätzlich müssen die im Fahrbahnbau zum Einsatz kommenden Zementen einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt aufweisen (na)-Zemente (TL Beton-StB / ARS 12/2006). Bei zweischichtiger Bauweise müssen im Unter- wie auch im Oberbeton Zemente gleicher Art und Festigkeitsklasse verwendet werden.

Abhängig von Belastungsklasse und Oberflächentextur muss der Mindestzementgehalt bei Fahrbahnen der Belastungsklassen BK 100 bis BK 1,8 mit mindestens 340 kg/m³ betragen. Wird die Fahrbahnoberfläche als Waschbeton ausgeführt, muss nach ZTV-Beton-StB 07 der Zementgehalt mind. 420 kg/m³ betragen und die Gesteinskörnung darf einen Größtkorndurchmesser von höchstens 8 mm besitzen.

Zur Absicherung des Frost- und Tausalzwiderstands muss der Beton für Straßendecken als Luft-porenbeton hergestellt werden. Der Luftporenbildner (LP-Mittel) bildet im Frischbeton Mikro-Luftporen mit einem Durchmesser zwischen rund 10 und 300 µm erzeugen. Diese Poren bleiben nach dem Erhärten des Betons im Porensystem erhalten und mindern das kapillare Saugen. Solche Poren wirken im Fall des Unterschreitens der Gefrierpunkttemperatur als Ausweichraum, wenn sich durch das Gefrieren das Volumen des Wassers im Porengefüge vergrößert. Für einen ausreichend hohen Frost-Tausalz-Widerstand ist in verdichtetem Beton ein ausreichender Gehalt von kleinen Luftporen mit einem Durchmesser von weniger als 300 µm (Mikro Luftporen A300 in Vol.-%) erforderlich. Außerdem muss ein weiterer Luftporenkennwert, der Abstandsfaktor L in mm, eingehalten werden. Hierbei handelt es sich um einen Kennwert, der aus einem idealisierten Porengefüge abgeleitet wurde, der den größten Abstand eines Punktes des Zementsteins vom Rand der nächsten wirksamen Luftpore kennzeichnet.

Nach ZTV Beton StB wird an die fertige Betondecke ein Luftgehalt des Frischbeton gefordert, der bei einem Größtkorn \geq 32 mm für Betone ohne BV oder FM einen Einzelwert des Luftgehalts \geq 3,5 Vol.-% und im Tagesmittel \geq 4,0 Vol.-%. Bei einem Größtkorn von 16 mm erhöht sich der Einzel- und der Tagesmittelwert um 0,5 Vol.-%.

Werden Betone mit BV oder FM zum Einsatz gebracht, muss der Einzelwert des Luftgehalts \geq 4,5 Vol.-% und im Tagesmittel ein Wert von \geq 5,0 Vol.-% sichergestellt werden.

Bei der Herstellung von Waschbeton mit einem Größtkorn von 8 mm mit und ohne FM/BV muss der Einzelwert 4,0 Vol.-% und der Tagesmittelwert 4,5 Vol.-% überschreiten.

Als Luftporenkennwerte werden für den Festbeton, die im Zuge von Bohrkernen an der Fahrbahn gewonnen wird in der Eigenüberwachungsprüfung ein Mikroluftporengehalt A300 \geq 1,5 Vol.-% und ein Abstandsfaktor von L \leq 0,24 mm gefordert.

Im Vorfeld der Optimierung der Mischungszusammensetzung wurden zu Beginn des Vorhabens am Beispiel des Oberbetons, der für die Waschbetonherstellung geeignet sein sollte, die Mischungszusammensetzung entwickelt und optimiert. Bei waschbeton sind weitere Anforderungen der TL Beton-StB 07 zu berücksichtigen, da hiernach der Zementgehalt mindestens 420 kg/m³ aufweisen und zudem der Gehalt an feinkörnigen Bestandteilen, d.h. Zement und Gesteinskornpartikel < 0,25 mm, mehr als 500 kg/m³ betragen muss.

Für den Oberbeton ist folglich die Menge des zuzugebenden Zements festgeschrieben. Die Menge des Wassers ist durch den zu erzielenden w/z-Wert vorgegeben, so dass die Herausforderung der Mischungsentwicklung darin besteht, das Verhältnis der Gesteinskörnungen optimal zu berechnen und die Menge der Betonzusatzmittel zu bestimmen.

Beim herzustellenden Waschbeton ist die Besonderheit, dass es sich um eine sogenannten Ausfall-körnung handelt. Dadurch kann die oberflächliche Zementmörtelmatrix des Betongemisches im Zuge der Nachbearbeitung mittels Bürsten wieder entfernt werden (vgl. Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton - M OB). Hierzu wird nach Fertigstellung des fertig eingebauten, verdichteten und geglätteten Oberbetons auf der Oberfläche ein dünner Film eines Oberflächenverzögerers oder eines Kombinationsmittel aus Verzögerer und Nachbehandlungsmittel, gleichmäßig aufgesprüht. Der Verzögerer bewirkt, dass das Erhärten der oberen Randzone für eine begrenzte Zeit bis in eine definierte Tiefe verzögert wird. Dadurch wird das spätere mechanische Ausbürsten des Oberflächenmörtels ermöglicht, dessen Zeitpunkt im Wesentlichen von den Witterungsbedingungen abhängt. Nach ausreichender Erhärtung und Befahrbarkeit des Betons wird das Gerüst der groben Gesteinskörnung durch Ausbürsten si freigelegt, dass die Oberfläche aus gleichmäßig angeordneten sichtbaren groben Gesteinskörnungen besteht. Die dabei entstehende Texturtiefe soll zwischen 0,6 und 1,1 mm liegen. Mit dieser Regelbauweise lässt sich eine gute Griffigkeit und Lärmminderung von DStrO= -2 dB(A) erreichen.

6.1.1.2 Ausgangsstoffe der im Vorhaben am IWB-Technikum hergestellten Betone

Bei der Betonherstellung mit der Technikumsmischanlage am IWB wurden die nachfolgenden drei Rezepturen verwendet, die auch in den beiden Demonstrationsstrecken zum Einsatz gekommen sind.

In der ersten Demonstrationsstrecke wurde ein Ober- und ein Unterbeton entsprechend der Mischungsrezepturen in Tabelle 6.1 (Oberbeton) und Tabelle 6.2 (Unterbeton) verwendet. In der zweiten Demonstrationsstrecke wurde die in Tabelle 6.3 aufgezeigte Mischungszusammensetzung mit zweilagigem Einbau eingesetzt.

	1m ³	Volumen (dm ³ /m ³)
Gesteinskörnung gesamt	1819,4 kg	620,4
feine Gesteinskörnung 0/4	536,5 kg	204,7
grobe Gesteinskörnung 5/8	1282,9 kg	415,7
Zement: CEM I 42,5N	420 kg	135,5
Leitungswasser	182 kg	182
Luftporen		60
PANTAPOR 66K Ha-Be	2,1 kg	2,1
Summen	2423,5 kg	1000

Tabelle 6.1: Mischungsrezeptur für den Oberbeton (Einsatz in der ersten Demonstrationsstrecke)

Tabelle 6.2: Mischungsrezeptur für den Unterbeton (Einsatz in der ersten Demonstrationsstrecke)

	1m ³	Volumen (dm³/m³)
Gesteinskörnung gesamt	2003,9 kg	685,3
feine Gesteinskörnung 0/4	538,9 kg	205,6
grobe Gesteinskörnung 5/8	274 kg	89,1
grobe Gesteinskörnung 8/16	538,5 kg	178,2
grobe Gesteinskörnung 16/22	652,5 kg	212,4
Zement: CEM I 42,5N	350 kg	112,9
Leitungswasser	150 kg	150
Luftporen		50
PANTAPOR 66K Ha-Be	1,8 kg	1,8
Summen	2505,7 kg	1000

	1m³	Volumen (dm³/m³)
Gesteinskörnung gesamt	2003,3 kg	683,2
feine Gesteinskörnung 0/2	535,3 kg	204,9
grobe Gesteinskörnung 2/8	315,9 kg	102,5
grobe Gesteinskörnung 8/16	522,3 kg	170,8
grobe Gesteinskörnung 16/22	629,8 kg	205
Zement: CEM III/A 42,5N	360 kg	120
Leitungswasser	150 kg	150
Luftporen		45
PANTAPOR 66K Ha-Be	1,8 kg	1,8
Summen	2515,1 kg	1000

Tabelle 6.3: Mischungsrezeptur für den Beton der zweiten Demonstrationsstrecke für die bewehrte und die unbewehrte Bauweise

Im Unter- und Oberbeton der ersten Demonstrationsstrecke wurde ein CEM I 42,5 N und im Beton der zweiten Demonstrationsstrecke ein CEM III/A 42,5N zum Einsatz gebracht. In allen drei Betonen wurde Basalt als Gesteinskörnung verwendet. Für die Versuche mit der realmaßstäblichen Doppelwellenmischanlage wurden die Materialien stets mit gleicher Herkunft bzw. gleicher Art verwendet, wie diese vom Verbundpartner der Fa. Schnorpfeil eingesetzt wird. Als Luftporenbildner wurde das von Fa. Schnorpfeil verwendete PANTAPOR 66K von Ha-Be übernommen.

Im Unterbeton kommen vier Gesteinskornfraktionen 0/4, 5/8, 8/16 und 16/22 zum Einsatz. Beim Oberbeton handelt es sich um eine Waschbetonrezeptur, die eine Ausfallkörnung aufweist und in der die beiden Gesteinskornfraktionen 0/4 und 5/8 Verwendung finden. Der Beton des zweiten Demonstrators verfügt auch über vier Gesteinskornfraktionen allerdings aus einem Sand 0/2 und den Splitten 2/8, 8/16 und der Grobkornfraktion 16/22 mm.

Von allen drei Mischungen wurden Vorversuche mit dem Einwellen-Laborzwangsmischer vorgenommen, bevor mit der Installation und Inbetriebnahme der Technikums-Mischanlage am IWB dann die umfassenden Versuchsreihen vorgenommen werden konnten.

Von den Gesteinskörnungen wurden die folgenden Mengen im Laufe des Vorhabens vom IWB beschafft und in den Versuchen verarbeitet:

Tabelle 6.4: Beschaffte und verbrauchte Mengen der im Vorhaben BF 4.0 im IWB-Mischtechnikum verarbeiteten Gesteinskörnungen, Zemente und LP-Bildner

	Tonnen
Feine Gesteinskörnung 0/4	60
feine Gesteinskörnung 0/2	15
grobe Gesteinskörnung 2/8	15
grobe Gesteinskörnung 5/8	40
grobe Gesteinskörnung 8/16	80
grobe Gesteinskörnung 16/22	80
Zement CEM I 42,5N	30
Zement: CEM III/A 42,5N	15
PANTAPOR 66K Ha-Be	0,5

Zur Durchführung des im Antrag aufgezeigten Versuchsprogramms mussten über 300 Mischversuche vorgenommen werden (vgl. Tabelle 6.6). Um die für die Entwicklung und Erprobung der rheologiegestützten Mischprozessführung erforderlichen Mischreihen zu realisieren war folglich ein weit über das ursprüngliche Antragsvolumen hinausreichendes Volumen an Ausgangsstoffen für die Betonherstellung erforderlich. Tabelle 6.5 kann hierzu verdeutlichen, welche Stoffströme für die Untersuchungen an der realmaßstäblichen Technikumsmischanlage erforderlich wurde. In der Summe wurden über 300 Tonnen Gesteinskörnung und 40 Tonnen Zement bestellt und verarbeitet.

Tabelle 6.5: Materialverbrauch 2020/21

Materialverbrauch	
Gesteinskörnung	Menge [t]
0/2	82,5
2/8	86
8/16	58
16/22	87
Zement	
CEM I	18,5
CEM III	29

Die für die Betonage notwendigen Gestein Körnungen wurden an das IWB in Big-Packs geliefert mit Sattelzügen geliefert. In Tabelle 6.5 wird die Menge der ersten Lieferung deutlich, welche einzeln abgeladen und wie in der rechten Darstellung aufgezeigt über das Förderband in das Satteltaschensilo der Anlage befüllt wird. Nach diesem hohen logistischen Aufwand wurden wie in *Abbildung 6-2* U-förmige Schüttguthalden gebaut. Mit diesen konnten die Gesteinskörnungen mit verringertem Aufwand bestellt, gelagert und mittels einer Schaufel (vgl. rechtes Foto in *Abbildung 6-2*, welche am Stapler befestigt wird, um die Gesteinskörnung mittels Förderband in das Silo zu befüllen.

Gesteinskornzusammensetzung

Um die Gesteinskornzusammensetzung des Oberbetons zu optimieren, wurde in einem ersten Schritt das modifizierte Andreassen-Modell herangezogen. Mithilfe eines entsprechenden Excel-Solvers konnten die Volumenanteile der zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffe bestimmt werden.

$$Durchgang [Vol. -\%] = \frac{d^q - d_{min}^q}{D^q - d_{min}^q} * 100$$

d	Betrachtet Partikelgröße
d_{min}	Minimale Partikelgröße
D	Maximale Partikelgröße
q	Verteilungsmodul

Entsprechend des Modells wird für jede vorhandene Partikelgröße der Durchgang in Vol.-% berechnet, der sich durch das Verhältnis zwischen Größtkorn und Kleinstkorn des Mischungsentwurfs ergibt. Durch Wahl eines geeigneten Verteilungsmoduls q kann dann die Soll-Sieblinie angepasst werden.

In den Versuchen, die im Rahmen einer Bachelorarbeit unterstützt wurde [Mohr 2018], erfolgte zunächst eine Charakterisierung der Kornzusammensetzung der einzelnen Gesteinskornfraktionen. Die dem Betongemisch zugrunde liegende Soll-Sieblinie der Gesteinskörnung wird dann durch die Charakteristik der verwendeten Gesteinskornfraktionen definiert und dient als Grundlage der Anpassung.

Durch eine Variation des Verteilungsmoduls verändert sich der Durchgang der Ist-Sieblinie, wodurch Differenzen zwischen der Ist- und der Soll-Sieblinie entstehen, die als Fehlerquadrate bezeichnet werden. Nach Eingabe der Randbedingungen der TL Beton-StB 07 hinsichtlich Mindestzementgehalt und w/z-Gehalt in den Excel-Solver, kann mithilfe des Andreasen-Models die Ist-Sieblinie an die Soll-Sieblinie angepasst werden (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 6-1: Sieblinie nach Andreassen-Modell u.a. [3]

Durch eine Anpassung der Anteile der einzelnen festen Mischungsbestandteile ist es gelungen, die Ist- Sieblinie der Soll-Sieblinie nach dem modifizierten Andreasen-Modell anzugleichen. Hervorzuheben ist, dass der flachere Teil der Kornbestandtele mit Partikeldurchmessern zwischen 2000 und 5000 µm der Soll-Sieblinie auf die Verwendung der Ausfallkörnung im Waschbeton zurückzuführen ist. Bei der Ist-Sieblinie ist zu erkennen, dass trotz der Ausfallkörnung nur ein kleiner Anteil der Gesteinskörnung eine Größe zwischen 2-5 mm besitzen. In diesem Größenbereich findet sich nur das Überkorn der Gesteinskörnung 0/ mm wie auch das Unterkorn der Ausfallkörnung 5/8 mm.

Für die Vorversuche wurden die Mengen der zuzugebenden Fließmittel und des Luftporenbildners anhand des Beispielmischungsentwurfs des Informationszentrums Beton (vgl. Tabelle 6.6) abgeleitet. Da hier Betonverflüssiger anstelle von Fließmittel verwendet wurde und Fließmittel im Allgemeinen geringer dosiert werden, wurde die Menge im ersten Versuch auf 0,3 % des Zementgewichts halbiert. Auch die Menge des Luftporenbildners wurde geringer gewählt, da im ersten Versuch der Luftporenbildner "PANTAPOR 66K", ein Luftporenbildner in konzentrierter Form, verwendet wurde.

So wurden nur 0,15 M.-% des Zementgewichts an Luftporenbildner verwendet, was umgerechnet ca. 1,5 ml je kg Zement entspricht.

Tabelle 6.6: Beispiel für einen Waschbeton Informationszentrum Beton GmbH "Fahrbahndeckenbeton für Straßen" (2015)

Fahrbahndeckenbeton Oberbeton (Waschbeton)

Beton C30/37, XF4		
Zement: CEM I 42,5 N		430 kg
Wasser		176 kg
Wasserzementwert		0,42
Gesteinskörnung, gesamt		1.640 kg
33 % feine Gesteinskörnung	0/2 mm	541 kg
67 % gebrochene, grobe Gesteinskörnung	5/8 mm	1.099 kg
Betonzusatzmittel:		
Luftporenbildner	0,40 % des Zementgewichts	
Betonverflüssiger	0,60 % des Zementgewichts	

Der anhand des Andreasen-Models errechnet Mischungsentwurf wurde anschließend umgesetzt. Eine Probemessung des Luftporenanteils mit dem LP Topf ergab einen deutlich zu hohen Luftporengehalt. In weiteren Versuchen wurden die Herstellerangaben von 0,25 ml je kg Zement eingesetzt, die sich in den folgenden Versuchen als angemessene Menge an Luftporenbildner erwiesen. Doch stellte sich auch weiterhin der Frischbeton als zu wenig plastisch entsprechend der Vorgaben an einen Oberbeton dar. Das frische Oberbetongemisch erwies sich als sehr trocken dar. Die Ursache wurde im hohen Anteil der feinen Gesteinskörnung 0/2 gesehen, die eine höhere Dosierung der Menge an zuzugebenden Anmachwasser oder auch mehr Fließmittel benötigen würde, um nicht so schnell anzusteifen.

Da der vorgegebene w/z-Wert von 0,42 nicht verändert werden sollte, wurde der Anteil der feinen Gesteinskörnung angepasst. Daher wurde eine weitere Randbedingung im EXCEL-Solver hinterlegt, die einen maximalen Gehalt der feinen Gesteinskörnung 0/2 (Sand) von 650 kg/m³ vorgibt, um damit dann die neue Feststoffverteilung zu berechnen. Der für den Oberbeton angesetzte Verteilungsmodul von 0,4 führt dann zu den in Tabelle 7 dargestellten Verhältnissen.

Wird das Verhältnis von feiner Gesteinskörnung zu gebrochener Gesteinskörnung ohne den Anteil des Zements errechnet, kommt es zu einem Verhältnis von 34 % feiner Gesteinskörnung zu 66 % grober Gesteinskörnung. Dies entspricht weitestgehend den Verhältnissen der beispielhaften Rezeptur des Waschbetons entsprechend der Tabelle 6.6.

Die gewählte Menge des Fließmittels in Höhe von 0,3 M.-% des Zementgehalts führte zu einem gut verarbeitbaren Beton. Daher wurde die Menge des Fließmittels in den weiteren Versuchsreihen beibehalten. Allerdings wurde die Menge des Luftporenbildners in den durchgeführten Versuchsreihen so gewählt, wie diese in den jeweiligen technischen Merkblättern der Hersteller als optimale Menge zum Erreichen von 4,0 – 4,5 Vol.-% empfohlen wurden. Im Falle des synthetischen Luftporenbildners "PANTAPOR 66K" wurden 0,25 ml je kg Zement und im Falle des natürlichen Luftporenbildner "PANTAPOR 2020" 0,5 ml je kg Zement zugegeben.

Da weitere Zusatzstoffe im Straßenbeton in der Regel nicht verwendet werden, wurde auch bei der eigenen Mischungsentwicklung in den anfänglichen Versuchsreihen auf die Verwendung weiterer Betonzusatzstoffe verzichtet.

Der mittels Andreassen-Model hinsichtlich der Korngrößenverteilung optimierte Mischungsentwurf wurde anschließend umgesetzt und die einzelnen Ausgangsstoffe entsprechend der Zusammenstellung in Tabelle 6.7 in den aufgezeigten Mengenverhältnissen verwogen und im Weiteren mit einem Einwellenmischer vermischt.

Material	Anteil [Vol%]	Anteil red. [Vol%]	Anteil red. [kg]	Dichte [g/cm³]
CEM I 42,5 N	15,44	12,93	420,00	3,249
feine Gesteinskörnung 0/2	29,18	24,44	650,00	2,66
Gebrochene, grobe Gesteinskörnung 5/8	55,39	46,39	1247,81	2,69
Summe	100,00	-	-	-

Tabelle 6.7: Beispiel für einen Waschbeton InformationsZentrum Beton GmbH "Fahrbahndeckenbeton für Straßen"

6.1.1.3 Frischbetonherstellung

Vorversuche im Konusmischsystem

Straßenbetone sind nach ZTV-Beton-StB 07 in Mischanlagen mit einem Zwangsmischer herzustellen. Zunächst sollte antragsgemäß das am IWB verfügbare Konus-Intensivmischsystem zum Einsatz kommen, das über eine FU-Regelung und einen entsprechenden Drehgeber auch in der Lage wäre, infolge des Direktantriebs der zentrisch positionierten Mischwelle im Labormaßstab die Machbarkeit und die Potenziale der rheologiegestützten Mischprozessführung zu erproben. Allerdings erwies sich in den ersten Versuchen der am IWB entsprechend mit einem 30 Liter Mischgefäß ausgestattete Kniele Konus-Mischer KKM 30 als nur bedingt einsetzbar für die besonders steifen Fahrbahnbetone, da die innenliegenden Mischwerkzeuge die Vermischung der üblicherweise trocken dem Mischer vorzulegenden Feststoffkomponenten mit der anschließenden Wasserzugabe anfänglich nur schwer vermischen kann. Die außenliegenden Abstreifer sind in der anfänglichen Mischphase nicht in der Lage, die Trockenstoffe dem inneren Mischwerkzeug so zuzuführen, dass sich die Ausgangsstoffe rasch vermischen und homogenisieren lassen. Als weiteres Problem erwies sich der Auslass am unteren Abschluss des Konus für die sehr steifen Gemische. So ließ sich der steife Frischbeton nicht ohne Stochern aus dem Mischer herausführen.

Grundsätzlich hätten sich auch die steiferen Straßenbetone im Konus-Mischsystem mischen und homogenisieren lassen, doch wäre eine Anpassung der Werkzeuge an der inneren zentrisch angeordneten Mischwelle erforderlich gewesen. Die am IWB verfügbaren Werkzeuge mit Stiftwirbler sind speziell auf die Herstellung von Hochleistungsbetone und SVB ausgelegt, um diese anspruchsvollen und sehr feinstoffreichen Betongemische mit einem hohen Mischenergieeinsatz auch bei w/z-Werte von unter 0,3 vollständige aufzuschließen und homogenisieren zu können. Diese Betone erzielen dabei sehr fließfähig, leicht verdichtbare bis selbstverdichtende Eigenschaften.

Einwellen-Zwangsmischer

Am IWB wurde neben dem Konus-Mischsystem auch ein Einwellen-Zwangsmischsystem beschafft, das mit einem Frequenzumrichter und einer leistungsstärkeren Motoreinheit ausgestattet wurde, so dass auch mit diesem der gezielte Mischenergieeinsatz zur intensiven Vermischung des Ausgangsstoffgemisches bis zum vollständigen Aufschluss auch aller feinen Bestandteile und damit bis zur Erreichung eines homogenen und gleichförmigen Frischbetons möglich ist.

Der "LABORZWANGSMISCHER CEM 60 S ELBA", der von der Ammann Group hergestellt wird und in den Abbildung 6.2 und 6.3 aufgezeigt ist, verfügt über ein Mischvolumen von 90 Litern Trockenfüllung. Das Fassungsvermögen erlaubt folglich 60 Liter eines verdichteten Frischbetons in der Mischtrommel herzustellen. Damit weist er auch das für die Durchführung der Laborversuche im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" erforderliche Fassungsvolumen. Für die Durchführung der Versuchsreihen wurden die Mischwerkzeuge mit einem Gummiaufsatz ausgestattet.



Abbildung 6-2: Blick in das Mischgefäß des Einwellenmischers CEM 60 S ELBA mit Gummiaufsatz auf dem Mischwerkzeug

Die Motorleistung des Mischers beträgt 7,5 kW und erfordert eine Betriebsspannung von 400 V. In den Versuchen wurden die Ausgangsstoffe bei einer konstanten Motordrehzahl vermischt. Bei maximaler Drehzahl des Motors von 1500 U/min führt bei einem Übersetzungsfaktor von 27,41 zu einer Werkzeugdrehzahl von 54,7 U/min. Bei dieser Drehzahl wir der Motor nur zu 10 bis 15 % ausgelastet.

Bei einer Mischwellendrehzahl von 54,7 U/min stellt sich eine Winkelgeschwindigkeit der Welle für eine Umdrehung in Höhe von 5,7 s-1 ein. Bei einem Radius des Mischwerkzeugs von 27 cm erreicht das Mischwerkzeug folglich eine Geschwindigkeit von 1,55 m/s.

Die maximale Winkelgeschwindigkeit erreicht der Mischer bei maximalem Leistungseinsatz von 7,5 kW und dem infolge des Widerstands des Frischbetons abgerufene Drehmoment des Antriebsmotors. Daraus ergibt sich eine maximale Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs von 2,8 m/s bei gleichem Radius von 27 cm.

Um die Leistungsverhältnisse des Einwellenmischers zu verdeutlichen, ist in Abbildung 10 dargestellte Freifallmischer herangezogen.



Abbildung 6-3: Einwellenmischer CEM 60 S ELBA mit FU-Regelung und leistungsstarkem 7,5 kW

Die Trommelgeschwindigkeit erreicht eine Drehzahl von 26,6 U/min. Dabei entspricht der Maultrommelradius von 19,25 cm dem Werkzeugradius. Hieraus lässt sich eine Frequenz von 0,44 U/s ableiten, die wiederum zu einer Winkelgeschwindigkeit von 2,8 s⁻¹ führt. Die Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs beträgt folglich 0,54 m/s und liegt damit nur bei einem Fünftel des Einwellenmischsystems.



Abbildung 6-4: links: Freifallmischer Typ Betonmischer Zementmischmaschine 150 L 650 W Stahl in Orange rechts: E 120 Zwangsmischer 120 L

Auch der Vergleich mit einem häufig in Prüflaboren anzutreffenden Zwangsmischer, der im Rechten Foto von Abbildung 6.4 dargestellt ist, verdeutlicht, dass bei einer Motorleistung von 2 kW und einer vereinfachten Annahme, dass der Durchmesser des Mischers von 64 cm als Werkzeugdurchmesser angenommen wird eine Frequenz von 32 U/min leistet. Daraus lässt sich eine Winkelgeschwindigkeit von 3,35 s⁻¹ berechnen. Bei einem Radius von 32 cm beträgt hier die Mischwerkzeug-Geschwindigkeit 1,07 m/s.

Das im Vorhaben eingesetzte Einwellen-Mischsystem hat folglich eine etwa 2,5-fach höhere Mischwerkzeuggeschwindigkeit infolge seiner hohen Motorleistung. Von Vorteil ist zudem die horizontale Mischrichtung des Einwellenmischers, die wie beim Doppelwellenmischsystem Vorteile bei der Vermischung der Frischbetonherstellung bietet.

6.1.1.4 Mischungszusammensetzung

Um bei jedem Mischvorgang die gleichen Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Ausgangsstoffkomponenten Zement, Gesteinskörnung 0/2 und 5/8 in den Mischer gegeben und in trockenem Zustand durchmischt. Erst anschließend wurde das Anmachwasser, dem zuvor

Der Luftporenbildner und das Fließmittel untergemischt wurde, zugefügt und der Mischvorgang durchgeführt. Die Mischzeit wurde in den Versuchen erst von dem Moment an gemessen, zu der die Motordrehzahl des Einwellenmischsystems die volle Werkzeuggeschwindigkeit in Höhe von 1500 U/min erreicht hatte.

6.1.1.5 Prüfung der Frischbetoneigenschaften an dem nach Andreasen optimierten Oberbeton

Entsprechend der Anforderungen der ZTV-Beton-StB 07 muss die Einhaltung des geforderten Luftporengehalts unmittelbar vor dem Einbau an der Einbaustelle nachgewiesen werden. Daher wurde in der Versuchsreihe der Frischbeton aus dem Mischer entnommen und direkt im Anschluss in die Luftporentöpfe gefüllt.

Die Luftporentöpfe wurden auf dem Rütteltisch eine Minute lang verdichtet. Zur Anpassung der Wassermenge wurde wegen der Feuchte der Gesteinskörnung ein Feuchtemessgerät verwendet. Bei vorhandenem Wasser in der Gesteinskörnung musste diese im Mischungsentwurf berücksichtigt werden, um die Menge des Zugabe-Wassers und der Menge an Gesteinskörnung zu bestimmen.

Die Bestimmung der Frischbetoneigenschaften, so der Frischbetonrohdichte, dem Verdichtungsmaß wie auch des erzielten Luftgehalts erfolgte mit den bereits in Abschnitt 2.2.2.2 aufgezeigten Prüfverfahren. Zudem wurde im Labor zur Luftgehaltsbestimmung neben dem LP-Topf auch ein Super Air Meter zum Einsatz gebracht. Gleichermaßen wurden ergänzend auch die Mikroluftporen mit dem im Rahmen des Vorhabens Betonfahrbahn 4.0" beschafften Air Void Analyzer im Zuge der Laboruntersuchungen analysiert.

6.1.1.6 Packungsdichteoptimierung der Mischungsrezeptur für Fahrbahnbetone

Die Packungsdichte des Betons beschreibt das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen und stellt damit eine aussagekräftige Kenngröße für die zu Bewertung der erzielbaren Fest- und Frischbetoneigenschaften dar. Eine Steigerung des Feststoffvolumens führt i.A. zu Verbesserungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften. Dabei nimmt die Packungsdichte eines Betongemisches zu, wenn die Hohlräume zwischen den Feststoffen mit feinen Partikeln gefüllt werden. Wird Wasser zugegeben, füllen sich zunächst die zugänglichen Hohlräume. Das restliche Anmachwasser legt sich erst später als Gleitfilm auf die Partikel. Daher wird mit zunehmender Packungsdichte trotz reduzierter Wasserzugabe eine bessere Verarbeitbarkeit und Robustheit erzielt, da der Wasseranspruch mit sinkendem Hohlraumgehalt geringer wird.

Wie bei allen sonstigen Hochleistungsbetonen ist auch beim Fahrbahnbetonen zu erwarten, dass die Partikelform, die Partikelgrößenverteilung und der Energieeintrag während des Mischens, des Einbaus und des Verdichtens die Packungsdichte beeinflussen. Um das bestmögliche Korngefüge und somit eine hohe Packungsdichte für die Fahrbahnbetone zu erreichen, wird das Gemisch der zum Einsatz kommenden Gesteinskornfraktionen entsprechend der in DIN EN 1045-2 aufgezeigten Sieblinienbereiche zusammengesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit einer geringen Oberfläche der Kornzusammensetzung ein geringer Zementleimanspruch besteht, allerdings die Verarbeitbarkeit erschwert wird. Doch ist für Fahrbahnbetone besonders die gute Einbaubarkeit und die hohe Verdichtbarkeit mit dem Gleitschalungsfertiger von besonderer Bedeutung. Entsprechend sollte auch die Oberflächenausbildung der Gesteinskörnung hiernach gewählt werden.

Um die Partikelzusammensetzung aller Ausgangsstoffe bis hinunter in den Feinkornbereich bewerten zu können, wurden alle im Fahrbahnbeton zum Einsatz kommenden festen Ausgangsstoffe mit dem Laser-Partikelmessgerät Microtrac S3500 – BW auf deren Partikelgrößenverteilung und der speziischen Kornform der Partikel untersucht. Mit diesem Laser-Partikelmessgerät können alle Partikel im Größenbereich eines Durchmessers von 0,243 µm bis 1408 µm größentechnisch vermessen werden. Vor der Analyse werden die Kornfraktionen im Ofen bei 105 °C getrocknet. Anschließend können in einem zweiten Schritt die Partikel der gleichen Probe mit dem Microtrac S3500 SI nochmals fotografisch untersucht. Die hierin eingesetzte Kamera kann Partikel im Bereich von 1 µm bis 2000 µm analysieren. Anschließend können mit den Informationen beider Analyseeinheiten Informationen zur Größe, Oberfläche und Form der Partikel gegeben werden.

Optimierungsmodelle

Zur Mischungsentwicklung von Betonen mit hoher Packungsdichte gibt es zum einen den sieblinienoptimierten und zum anderen den packungsdichteoptimierten Ansatz. Ersterer wurde bereits anhand der anfänglich im Vorhaben angestrebten Optimierungen mit dem modifizierten Andreasenmodell vorgestellt. Das sieblinienbasierte Modell basiert auf der Füllung der Hohlräume von groben Gesteinskörnungen durch feine Partikel. Demgegenüber werden beim packungsdichteoptimierten Model der Wasser-Fließmittelanspruch, der Verdichtungsenergieeintrag und weitere Ausgangsstoffkennwerte zur Erzielung der Packungsdichte berücksichtigt.

Packungsdichte-basierte und optimierte Betongemische

Im Jahr 1931 wurde vom Wissenschaftler Furnas erstmals der Kleinstkorn für die Sieblinienoptimierung mitberücksichtigt, welches für ein binäres System gültig ist. Diese Gleichung gilt als Vorreiter für die Packungsdichteoptimierung, da Furnas zzgl. ein Verfahren zur Berechnung des Interaktionseffektes zwischen polydispersen Partikeln bei maximaler Packungsdichte entwickelte.

Zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Korngemische entwickelte Schwanda (1959) ein rechnerisches Verfahren. Dabei können indirekt die drei granulometrischen Eigenschaften Korngrößenverteilung, Kornform und Oberflächenrauigkeit, beschrieben werden. Die Berechnung lässt sich unabhängig von der Idealsieblinie durchführen und ist für Gemische aus Gesteinskörnung und Zement geeignet. Des Weiteren werden für die Berechnung zwei Materialparameter benötigt. Zum einen ist es der Hohlraumanteil der Einkornfraktion und

zum anderen die Reichweite der Teilchenbehinderung der Korngemische, welche im vornherein abzuschätzen sind.

In Abhängigkeit der Kugelordnung innerhalb von D=0,5236 für ein kubisches System und D= 0,7405 für ein rhomboedrisches System wird die theoretische Packungsdichte erreicht. Nach McGeary R.K. (1962) wird die höchstmögliche Packungsdichte mit einer monodispersen Kugelschüttung für D=0,625 erreichbar. Diese Feststellung fand er experimentell heraus.

Im Labor im Zentrum von Ponts und Chaussée entwickelten (1992) de Larrad, F. und weitere Wissenschaftler die Software Bétonlab, die verschiedene Modelle zum Compessible Packing Model (CPM) verknüpft. Die Grundidee war die Verkürzung des iterativen Entwicklungsprozesses im Labor, um somit eine schnelle Formulierung von geeigneten Betonrezepturen für spezifische Anforderungen an den Frisch- und/oder Festbeton zu ermöglichen. Wesentliche Voraussetzung der Anwendung der Software ist, dass die im Beton zu verwendenden Materialien mit ihren Eigenschaften in der Software angegliederten Datenbank eingepflegt werden. Dabei bildet das CPM den Zusammenhang zwischen einer Mischungszusammensetzung und den Betoneigenschaften in des Software backungsdichte, Frischbetonstabilität, Fließfähigkeit und Betonfestigkeit für neue Formulierungen der Mischungszusammensetzungen anbieten, welche später jedoch im Labor zu bestimmen bzw. im Falle von Annahmen zu überprüfen sind.

Die Ausgangsstoffe wie Gesteinskörnung, Zement und Zusatzstoffe sind im Einzelnen zu charakterisieren, um eine umfangreiche Eigenschaftsinformation über Partikelgrößenverteilung, den Wasser- Fließmittelbedarf und bei Verwendung von Bindemittel auch die Festigkeitsentwicklung des herzustellenden Betons zu erhalten. Nach Abschluss der Datensammlung kann mithilfe des CPMs, unabhängig von der Sieblinie, die optimale Packungsdichte ermittelt werden, welche den Eigenschaften Konform und Rohdichte der Ausgangsstoffe unterliegt. Je höher die Packungsdichte einer Fraktion ist, umso stärker wird sie bei der idealen Mischungszusammensetzung von der Software einkalkuliert, wenn die Packungsdichte als Zielgröße gewählt worden ist.

Dabei betrachtet die neu entwickelte Software BétonlabPro zunächst die virtuelle Packungsdichte, um die Packungsdichte von Betonmischungen unterschiedlicher Ausgangsstoffe berechnen zu können.

Die virtuelle Packungsdichte, ist eine vollständige Ausfüllung des betrachteten Volumenkörpers mit kompatiblen Partikeln, die durch einen maximalen Energieeintrag erreicht werden kann. In der Praxis ist dieser jedoch durch das Homogenisieren unterschiedlicher Ausgangsstoffe im Betonmischer nicht möglich. Bei der Berechnung wird daher im Mittel von Gesteinskörnungen ausgegangen, welche Hohlräume hinterlassen. BetonlabPro nimmt im Feinkornbereich die Ausgangsstoffe als dominierend an, welche diese Hohlräume schließen. Das Verhältnis von virtueller und realer Partikelverteilung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Durch die ausgefüllten Hohlräume steigt das Verhältnis Feststoffvolumen zum Gesamtvolumen, welches der virtuellen Packungsdichte entspricht.

Die reale Packungsdichte fällt zwangsläufig, durch die beliebige Anordnung der Partikel, niedriger aus. Um eine Annäherung der realen zur virtuellen Packungsdichte zu erlangen, ist bei steigendem Feststoffvolumen der Energieeintrag zu erhöhen. Dieser wird vom Verhältnis des vorhandenen Volumens einer Fraktion Φ i zum maximal möglichen Volumen dieser Fraktion Φ i* bei demselben Volumen der anderen Fraktion bestimmt und als Verdichtungsindex K bezeichnet. Bei Festlegung dieses Indexes kann die Differenz der realen von der virtuellen Packungsdichte berechnet werden. Die Software schlägt einen Verdichtungsindex für die Versuche zur Packungsdichteermittlung der Partikel, als auch für direkte Bindemittelversuche vor, welche unter experimentellen Erkenntnissen erlangt wurden.



Abbildung 6-5: Darstellung a) des realen Volumenanteil und b) virtuellen Volumenanteils zur Berechnung der Packungsdichte

Der Bearbeitungsvorgang der Software BétonlabPro und dessen Auswirkung auf den Beton sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

- 1. Schritt: Ermittlung der jeweiligen Gesteinskörnungsanteile für die Zusammensetzung mit maximaler Packungsdichte. Somit kann der Bedarf an Zementleim, für die ausgewählte Frischbetonkonsistenz gesenkt werden und ein hohes Volumen an Gesteinskörnung wirkt der Formänderung des festen Betons entgegen.
- 2. Schritt: Bestimmung der Zementleimzusammensetzung, welche für das Füllen der Hohlräume zwischen groben Gesteinskörnungen verantwortlich ist. I.d.R. kann die Zusammensetzung des Zementleims die Fließfähigkeit und Druckfestigkeit des Frischbetons erhöhen.
- 3. Schritt: Berücksichtigung über Luftporenbildner eingebrachte Luftporen in der Stoffraumrechnung zzgl. der herkömmlich in der Sieblinien betrachteten Zugabewasser und Fließmittel.

In seiner Dissertation (2000) entwickelte Reschke das Modell von Schwanda so weit, dass es nicht nur für Korngemische aus kleinen und groben Gesteinskörnungen, sondern auch Gemische aus Füllstoffen und Aggregaten benutzt werden kann.

Die letzte packungsdichteoptimierte Forschung kam von Geisenhanslüke (2008), der einen Computeralgorithmus entwickelte. Durch diesen Algorithmus kann die optimale Packungsdichte für Mehrkornmischungen mittels Software herausgearbeitet werden.

Einfluss auf die Optimierungsmodelle

Die Sieblinienoptimierung wird hauptsächlich vom Verteilungsexponenten q beeinflusst. Durch den Einsatz der Lasergranulometrie und weiteren neuesten Technologien ist die Optimierung der Sieblinie auch unter Berücksichtigung der Kornform möglich. Grundsätzlich wird die Packungsdichteoptimierung von vielen Faktoren beeinflusst. Wesentliche Faktoren sind die Korngrößenverteilung, die Kornverdichtung, die Kornform und die Rauigkeit der Oberfläche. Im Allgemeinen haben Teilchenbehinderung und Wandeffekt eine eher untergeordnete Rolle.

<u>Sieblinie</u>
Die linke Darstellung von Abbildung 12 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Sieblinie und Verteilungsmodul q. Dabei zeigt sich, dass ein hoher Verteilungsmodul zu einem niedrigeren Feinkorngehalt führt und umgekehrt. Daraus lässt sich eine indirekte Kornformberücksichtigung ableiten, wobei für selbstverdichtenden Beton ein kleiner q-Wert zwischen 0,22 bis 0,25 und ein höherer q-Wert für erdfeuchten Beton zwischen 0,35 bis 0,4 empfohlen wird. Ein hoher Verteilungsmodul führt dazu, dass weniger Wasser bei den Betonherstellung benötigt und somit sowohl die Grünstandfestigkeit, als auch die Druckfestigkeit gesteigert werden.

In der rechten Darstellung von Abbildung 6.6 sind die Korngrößenverteilungen nach Fuller, Andreasen sowie Funk & Dinger für Korndurchmesser 63 µm bis 32 mm dargestellt, die auf die höchsten Packungsdichte der Korngemische abzielen. Die dabei veranschaulichten Sieblinien berücksichtigen den Einfluss der Kornform nicht, welcher jedoch mit den neuesten Partikelmessverfahrenstechnologien, z.B. mit dem Part An 3D, berücksichtigt werden kann.



Abbildung 6-6: links: Idealsieblinie in Zusammenhang mit dem Verteilungsmodul q nach dem modifizierten Andreasen-Modell rechts: Sieblinienoptimierung der abgebildeten Modelle mit unterschiedlichen q-Werten im Korngrößenbereich 63 μm bis 32 mm

Packungsdichte

Bei der Korngrößenverteilung werden die Partikel als Kugeln angenommen, da somit die Berechnung für die Dichtefüllung eines Raumes maximal optimiert werden kann. Das bedeutet, dass ein leerer Raum, welches von größeren Kugeln bedeckt ist, kleine Hohlräume bilden, die dann von kleineren Kugeln ausgefüllt werden sollen und somit das Ziel eines komplett ausgefüllten und dichten Raumes erzielt wird.

Korngrößenverteilung

Bei der Korngrößenverteilung wird zwischen den zwei Kategorien A ("Apollonische Packung") und B ("Gesperrte Packung") unterschieden. In der Kategorie A bilden die groben Gesteinskörnungen ein dichtes Packungsskelett, indem Sie enger beieinander liegen. Die kleinen Lücken zwischen diesen groben und größeren Gesteinskörnungen werden dann von kleineren Gesteinskörnungen vollständig gefüllt. Praxisbezogen ist aber die extrem grobe Körnungsverteilung nicht umsetzbar. In der Kategorie B liegen die gröberen und größeren Gesteinskörnungen weiter auseinander und bilden ein wenig dichteres Packungsskelett. Das führt dazu, dass die großen Gesteinskörnungen von den kleineren Gesteinskörnungen komplett umhüllt werden. Die extrem feine Körnungsverteilung beansprucht damit mehr Wasser und nimmt den größten Teil der Oberfläche in Anspruch. Veranschaulicht werden diese zwei Kategorien in der unteren Abbildung 6.7.



Abbildung 6-7: Schematische Darstellung der A: apollonischen und B: der gesperrten Packung

<u>Kornverdichtung</u>

Neben der Packungsdichte und der Korngrößenverteilung kommt auch der Kornverdichtung eine große Bedeutung zu. So untersuchte Hummel im Jahr 1959 experimentell die Abhängigkeit der Packungsdichte von unterschiedlichen Korngemischen (Exponent n) bei verschiedenen Verdichtungsgraden von lose bis gerüttelten Kornpackungen (vgl. Abbildung 6.8). Dabei stellte er fest, dass bei gleicher Verdichtung Körner, die eine nahezu Kugelform besitzen (z.B. Sand), eine höhere Packungsdichte erzielen, als Körner die höheren kantigen Formen aufweisen (z.B. Basalt). In seinen Untersuchungen konnte er zudem belegen, dass der höchste erreichbare Wert der Packungsdichte auf die Kornverdichtung zurückzuführen ist.



Abbildung 6-8: Kornverdichtung von Sand/Basalt-Gemischen in Abhängigkeit von Kornform und Verdichtung nach Hummel

Diesem Ansatz folgte Schwanda, der einen Berechnungsansatz für den Hohlraumgehalt von Korngemischen entwickelte, welcher das Verhältnis von Hohlraumanteil zu Feststoff in einer Einkornfraktion und die Teilchenbehinderung der Körner untereinander berücksichtigt. Die Betrachtungen wurden von Schwanda mit Hilfe semi-empirischer Berechnungsmethode vorgenommen.

Sedan und De Larard haben einen Berechnungsansatz, Compressible Packing Model (CPM), entwickelt, indem ein Verdichtungsindex K berücksichtigt wird. Dieser beschreibt ein Maß für die Trockenlagerung eines Korngemisches, welches aus n Kornklassen mit den Kornanteilen y_i besteht. Definiert wird es dabei durch die Abhängigkeit der realen Packungsdichte Φ und den virtuellen Packungsdichten β und γ . Die kornformabhängig theoretische dichteste Lagerungsmöglichkeit der Kornklasse i bei Betrachtung als Einkornfraktion wird von der virtuellen Packungsdichte β i beschrieben. Hingegen bezieht sich die virtuelle Packungsdichte γ_i bei gleichgültigem theoretischem Ansatz auf die ideale Anordnung aller genutzten Kornklassen als ganzes Korngemisch. Eine Übereinstimmung stellt sich bei den virtuellen Packungsdichten β und γ dann ein, wenn ein Korngemisch aus einer Einkornfraktion betrachtet wird. Die nachstehende Gleichung 2 gibt den Betrachtungsansatz für den Verdichtungsindex des CPM-Modells wieder.



In Abbildung 6.9 wird dieser Zusammenhang am Beispiel einer Einkornschüttung veranschaulicht. Diese zeigt für die Einkornschüttung den Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Packungsdichte Φ und dem Verdichtungsindex K für verschiedene Verdichtungsarten auf, die jeweils zu einer spezifischen virtuellen Packungsdichte β (x-Achse) führen. Nähert sich der Verdichtungsindex k der angestrebten theoretisch maximal erreichbare virtuelle Packungsdichte β an, steigt die Kurve gegen unendlich an.



Abbildung 6-9: Zusammenhang zwischen tatsächlicher Packungsdichte und Verdichtungsindex für eine Einkornschüttung

<u>Kornform</u>

Wie bereits Hummel feststellen konnte, hat die Kornform einen wesentlichen Einfluss auf die Packungsdichte von Korngemischen. Die Findung eines Zahlenwerts zur vereinfachten Charakterisierung der Kornform ist jedoch nicht möglich.

In der Beschreibung von Körnern werden für die Kornform Begriffe wie rundlich, plattig, glatt, rau etc. verwendet. Diese geben aber keine Informationen zu den granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen. Grundsätzlich weichen bei natürlichen und gebrochenen Gesteinskörnungen, wie diese in Betonen zum Einsatz kommen, von geometrischen Idealformen wie z.B. Kugel, Würfel, Zylinder ab.



Abbildung 6-10: Charakterisierung der Kornform nach Form, Rundheit und Oberflächenstruktur nach Barett

Daher wird von Barett eine Beschreibung der Kornform derart vorgeschlagen, dass Aussagen zu Form, Rundheit und Oberflächenstruktur gesondert benannt werden. Mit der Form (1) wird die geometrische Beschaffenheit des Korns wiedergegeben. Die Rundheit (2) bezieht sich auf die Wölbungsradien an den Kanten des Korns. Die Oberflächenstruktur (3) wird als lokale Rauigkeit an eckig und kantigen Stellen der Außenfläche definiert. Die Überlegungen von Barret zur Beschreibung der Kornform sind in Abbildung 21 grafisch veranschaulicht.

<u> Sphärizität [SPHT]</u>

Als Möglichkeit zur Berechnung des Kornformwertes wird die Sphärizität genutzt, die sich mit einem fotooptischen Kornmesssystem (CPA-Analyse) ermitteln lässt. Die Sphärizität gibt Auskunft darüber, wie rund ein Korn ausfällt. Liegt der Sphärizitätswert näher bei 1, ist das Korn runder, da der Umfang des Kornes dem Umfang des flächengleichen Kreises näherkommt. Die Sphärizität wird auch von der Rauigkeit der Gesteinskörnung bestimmt. Wird ein formgleiches Korn mit einer glatten mit dem einer rauen Kornoberfläche verglichen, fällt der tatsächliche Umfang des glatten Korns kleiner aus. Die Sphärizität wird nach DIN ISO 9276-6.2 bestimmt. Durch die Sphärizität werden Aussagen zur objektiven Kornform mittels 2D-Messungen gewonnen, die die tiefenveränderliche Kronform nicht berücksichtigt.

Kornoberfläche

Die Kornoberfläche von Feinstoffen hat einen großen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften des daraus herzustellenden Leims. Das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen fällt bei kugeligen Partikeln geringer aus. Je größer die Abweichungen der Partikel zur Kugelform sind, desto höhere Verhältniswerte werden erzielt. Wird einem Beton anstelle kugeliger Stoffe volumengleich andere kugelformabweichende Stoffe eingebunden, steigt die Oberfläche an, so dass mehr Wasser gebunden wird und sich somit die Verarbeitbarkeit verringert.

Teilchenbehinderung

Auf die Packungsdichte wirkt sich auch die Teilchenbehinderung aus. Eine Teilchenbehinderung stellt sich ein, sobald feine Partikel nicht in die Zwischenräume der gröberen Gesteinskörner hineinkommen können. Als Grund für die Behinderung des Teilchenzutritts kann sein, dass die Gesteinskörner zu nah beieinanderliegen und so der Zugang zu den Zwischenräumen versperrt wird. Die Folge ist eine Minimierung der Dichtigkeit des Betonmatrix und das Nichterreichen einer optimalen Packungsdichte.

<u>Wandeffekt</u>

Wird Frischbeton in eine Schalung eingefüllt, erreichen Partikel des Gemisches auch die Schalungsoberfläche. Hier stellen sich Wandeffekte ein, da sich die Gesteinskörner und die feinen Mischungsbestandteile (Zemente, feine Gesteinskörner < 0,25 mm sowie Betonzusatzstoffe) nicht optimal anordnen können, da die Grenze der Schalungsoberfläche eine Barrikade darstellt. Geschieht die Anordnung in einem Bereich, welches nicht gestört wird, ist die Porosität geringer als in dem Bereich, die den Wandeffekt und somit eine Blockade für die Anordnung erfährt. Dieser Effekt kann vermindert werden, wenn der Anteil an grober Gesteinskörnungen reduziert wird oder der Anteil an feinen Partikeln im Gemisch gesteigert wird.

6.1.1.7 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Die Basis für die sieblinienoptimierte und für die packungsdichteoptimierte Mischungsentwicklung bilden die Korngrößenverteilung und die Rohdichte der Feststoffe. Im Rahmen diverser studentischer Arbeiten wurden die Ausgangsstoffe der Fahrbahnbetone charakterisiert. Nachfolgend werden insbesondere die Ergebnisse der Masterarbeit von Frau Esra Ünal [Ünal 2021] aufgezeigt, die bereits im Rahmen des Vorhabens "Betonfahrbahn 4.0" eine sehr eingehende Charakterisierung der Ausgangsstoffe von Fahrbahnbetonen zur Optimierung der Packungsdichte in ihrer Bachelorarbeit [Ünal 2018] vorgenommen hat.

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen zum einen mechanisch durch Sieben und zum anderen durch die fotooptische Erfassung und Analyse der festen Mischungsbestandteile mit dem Partikelmessgerät PartAn 3001L ermittelt. Die feinere Feststoffe des Gemisches, so der Zement und die weiteren gewählten Zusatzstoffe wurden mit dem Laserbeuger S3500 von Microtrac zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung untersucht. Neben der Ermittlung der Korngrößenverteilung ermöglichen beide Messgeräte auch, weitere Kornformkennwerte mit der Auswertung zu erhalten.

Die Rohdichte der Gesteinskörnungen wurden mit dem Pyknometer erfasst. Hier wird für die sieblinienoptimierte Mischungsentwicklung die Partikelkorngrößenverteilung und der Verteilungsindex q vorausgesetzt. Mit der Software BétonlabPro sind für die packungsdichtebasierte Mischungsentwicklung jedoch weitere Materialkennwerte notwendig. So muss zum einen die Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen wie auch die Packungsdichte der Einzelfraktionen aller Feststoffkomponenten ermittelt werden. Anhand des Bindemittelleims wird die Packungsdichte der Feinstoffe ermittelt, welches auch die Bestimmung des Wassermengenbedarfs und der Sättigungsdosierung der Fließmittel umfasst.

Mit den vorgenannten Untersuchungen werden die für den Einsatz von CPM (Compressible Packing Model) relevanten Ausgangsstoffparameter gewonnen. Das CPM erlaubt dann die ideale Zusammensetzung der diversen Ausgangskomponenten zu bestimmen, um eine optimale Packungsdichte zu erhalten. Darüber hinaus erlaubt BétonlabPro auch die Abschätzung der für einen vollständigen Aufschluss des Gemisches erforderlichen Mischdauer. Zudem werden die wichtigsten Eigenschaften des Frischbetons prognostiziert. In den weiteren Ausführungen werden die Versuchsabläufe detaillierter dargestellt.

<u>Gesteinskörnung</u>

Korngrößenverteilung mittels Siebturm

Für alle im Vorhaben zum Einsatz kommenden Gesteinskörnungen wurde grundsätzlich die Korngrößenverteilung mechanisch nach DIN EN 933-1 bestimmt. Die Korngrößenverteilungen der Gesteinskörnungen werden durch Siebung in einzelne Kornklassen zerlegt, anschließend gewogen und in M.-% angegeben. Eine Aussage und Ableitung zu weitergehenden Informationen wie Kornform und Sphärizität ist hierbei nicht möglich, da die ungleichförmigen Gesteinskörnungen in Klassen mit entsprechenden Maschenweiten der eingesetzten Quadratlochsiebe gesiebt werden.

Korngrößenverteilung mittels Mikrotac -PartAn 3001L

Neben den Siebanalysen wurde die Korngrößenverteilung aller festen Ausgangsstoffkomponenten (Gesteinskornfraktionen, Zemente, Zusatzstoffe) mittels des am IWB verfügbaren Partikelmessgerät PartAn 3001L analysiert. Dieses erlaubt eine computergestützte Bildanalyse der Gesteinskörnungen und steht am IWB zur Verfügung. Mit dem PartAn 3001L lässt sich die 3-dimensionale Projektionsfläche von Gesteinskörnungen erfassen, in dem das Partikel frei und rotierend fallend durch eine Kamera gescannt und als digitale Datei mit der Unterstützung einer Bildanalysesoftware ausgewertet werden.

Abhängig der Bildauflösung, Pixelgröße und Objektabstand können die am Objektiv vorbeigeführten Partikel hinsichtlich ihrer Merkmale wie Form, Größe, Oberflächenrauigkeit und Transparenz vom System erfasst und mit der Auswerte Software charakterisiert werden. Die Spanne der Größen der zu erfassenden Partikel kann zwischen 15 Mikrometern bis 35 Millimeter liegen.

Die Analyse beginnt zuerst mit der Befüllung des Messgerättrichters (1) mit dem zur Charakterisierung gewünschten Material. Durch die Verengung des Trichters fallen die Partikel zeitlich versetzt aus dem Trichter hinaus und treffen auf die Vibrationsplatte (2). Auf der Vibrationsplatte, welche rechts nach unten geneigt ist, werden die Partikel/Gesteinskörnungen gerüttelt und fallen frei in die Sammelbox (4). Während des freien Falls, wird jedes einzelne Partikel, welches den Sichtbereich der Kamera (3) durchläuft, durch das Gegenlicht der Beleuchtung als Schattenbild aufgenommen. Mit der Software können die einzelnen Korninformationen verknüpft werden, so dass die von CPM benötigten Informationen zur Anzahl, zu den Größen und zu den Kornformkennwerten für jedes Korn einer Ausgangsstoffkomponente gewonnen werden (vgl. Abbildung 6.11).



Abbildung 6-11: Messgerät PartAn 3D zur Charakterisierung der Partikel/Gesteinskörnungen

Feinanteil – Auswaschversuch nach DIN EN 933 – 1

Partikel deren Durchmesser kleiner als 0,063 mm werden als Feinanteil der Gesteinskörnung bezeichnet. Der Feinanteil einer Gesteinskörnung wird durch den Auswaschversuch nach DIN EN 933-1 bestimmt.

Er darf einen Anteil von 3 M.% nicht übersteigen. Ansonsten kann der Beton zum Schwinden neigen und er weist einen erhöhten Wasseranspruch auf. Letztlich steigt auch der Zementbedarf.

Zur Ermittlung des Feinanteils wird die Gesteinskörnung in einem Wärmeschrank bei 110 ±5 °C getrocknet und anschließend gewogen. Darauffolgend wird die Gesteinskörnung für 24 Stunden im Wasserbad gelagert und dann mit einem 0,063 mm Sieb ausgewaschen. Die auf dem Sieb verbleibenden Partikel werden im Wärmeschrank getrocknet und anschließend gewogen.

Ermittlung der Rohdichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6

Die Rohdichte und die Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen kann nach DIN EN 1097-6 mittels Pyknometer bestimmt werden. Dabei werden die Masse und das Volumen der untersuchten Probe und die daraus kalkulierte Größe der Gesteinskörnungsrohdichte bestimmt.

Zunächst wird das Eigengewicht des Pyknometers ermittelt. Anschließend werden die Gesteinskörnungen entsprechend der vorgegebenen Mindesteinwaagen in das leere Pyknometer eingefüllt. Die Mindestmenge hängt vom Größtkorn der untersuchten Gesteinskornfraktion ab. Anschließend wird unter Wahrung konstanter Temperaturverhältnisse die Flasche des Pyknometers bis zur Markierung mit Wasser aufgefüllt und die Messvorrichtung gewogen. In den Zeitintervallen 1 min, 5 min, 10 min, 15 min und 0,5 h werden weitere Messungen vorgenommen. Vor jeder Wägung wird das Wasser, das von der Gesteinskörnung aufgenommen wurde, bis zur Markierung mittels einer Pipette ausgeglichen.

Anschließend wird das Wasser aus dem Pyknometer mittels eines Tuchs zur Rückhaltung der Gesteinskörnung geleert und die zurückgebliebene Gesteinskörnung auf ein vorher abgewogenes, leeres Blech ausgebreitet.

Die anschließende Oberflächentrocknung erfolgt bei einer feinen Gesteinskornfraktion durch einen Lufttrockner, der nur so lange betrieben wird, bis die Oberflächen der Körner getrocknet ist. Die Trocknung der groben Gesteinskörnungen erfolgt mit zwei Tüchern, bis kein Wasserfilm mehr festzustellen ist, die Gesteinskörnung aber noch ein feuchtes Erscheinungsbild aufweist. Nach der jeweiligen Trocknung werden die Gesteinskörnungen im Blech gewogen.

Um auch die Wasseraufnahme nach 24-stündiger Lagerung berechnen zu können, werden die Gesteinskörnungen anschließend in einer Wärmekammer bei 110 ±5 °C getrocknet und nach dem Abkühlen auf Umgebungstemperatur gewogen.

Auf diese Weise können die für das BétonlabPro benötigten Rohdichten, so die scheinbare Rohdichte ρ_a , die Trockenrohdichte ρ_p , die Rohdichte auf wassergesättigter ρ_{rd} und die Rohdichte auf oberflächentrockener Basis p_{ssd} bestimmt werden. Nicht zuletzt lässt sich mit dem Versuch auch die Wasseraufnahme W_{A24} nach 24-stündiger Eintauchzeit bestimmen.

Porosität

Die Porosität der Gesteinskörnungen lässt sich anhand der zuvor ermittelten Trockenrohdichte und der Wasseraufnahme nach 24-stündiger Eintauchzeit berechnen.

Packungsdichte

Um die Packungsdichte zu bestimmen, die eine in einen starren Behälter eingefüllte Korngruppe einnimmt, muss das in Abbildung 6.12 aufgezeigte umschlossenen Volumen der Körner bestimmt werden und auf das Gesamtvolumen bezogen werden.



Porosität, die für Wasser zugänglich ist

Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Kompaktheit einer Gesteinskörnung

Die Kompaktheit bzw. Packungsdichte lässt sich mit dem LPC-Verfahren ermitteln, wie sie von der Software Betonláb Pro benötigt wird. Experimentell wird der links in Abbildung 19 aufgezeigte Versuchsaufbau genutzt, der aus einem Zylinder, einem Kolben, einem Tiefenmessgerät und einer Aufschlagplatte besteht. Zunächst wird die zu analysierende Gesteinskörnung getrocknet und dann auf 7 kg abgewogen und in den Zylinder in drei aufeinanderfolgenden Schichten eingefüllt. Jede einzelne Schicht wird mit 20 Stößen (20 Kurbelumdrehungen der Aufschlagplatte) beansprucht. Nachdem alle drei Einzelschichten eingebracht und verdichtet wurden, wird die Gesamte Befüllung nochmals 40 weiteren Stößen unterworfen. Abschließend kann dann die Höhe der verdichteten Gesamtprobe entsprechend der rechten Darstellung in Abbildung 6.13 bestimmt werden.



Abbildung 6-13: links: Versuchsaufbau des LPC-Verfahrens rechts: Ermittlung der Höhe für das LPC - Verfahren

Die Bestimmung der Höhe für das LPC-Verfahren wird zweimal durchgeführt und der Mittelwert im Weiteren verwendet. Daraus lässt sich das scheinbare Volumen derart berechnen, dass das Produkt aus der nach dem Verdichten gemessenen Höhe und der inneren Zylinderfläche gebildet wird.

Daraus lässt sich die Schüttdichte nach DIN EN 1097-3 aus dem Quotienten der Masse der eingewogenen Gesteinskörnung und dem scheinbaren Volumen bestimmen.

Der Quotient aus Schüttdichte und Trockenrohdichte führt dann zur Packungsdichte der jeweiligen Gesteinskornfraktion.

Die Packungsdichte gibt die echte Kompaktheit in einer engen Umgebung wieder. Die Software Betonláb Pro ermittelt schließlich in Verbindung mit der Granularität und einem festgesetzten Verdichtungsindex (K=9) die virtuelle und die unendliche Kompaktheit β für die betrachteten Gesteinskörnungen.

Zement und Betonzusatzstoffe

Partikelgrößenverteilung

Für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurde der S3500 Laserbeuger vom Hersteller Microtrac eingesetzt. Dieser erfasst eine Partikelgröße von $0,01 - 2800 \mu m$ und ist somit für Zemente und Zusatzstoffe geeignet. Hierbei greift der Laserbeuger auf die Nutzung des Streulichts von mehreren Laserstrahlen, die durch einen Partikelstrom projiziert werden. Von einem optischen Detektorfeld wird die Menge und Richtung des von den Partikeln gestreuten Lichts gemessen und dann von der Software analysiert. Der Messaufbau des Laserbeugers, der am IWB zu Verfügung steht, ist in Abbildung 6.14 schematisch dargestellt.



Abbildung 6-14: Laser Partikelgrößenermittlung mit dem S3500 Microtrac

Rohdichte

Die Ermittlung der Rohdichte für die in den Untersuchungen analysierten Zemente und Zusatzstoffe erfolgte mit dem bereits aufgezeigten Pyknometer. Zudem wurde mit Blick auf die Reaktivität des Zementes mit Wasser ein Heliumpyknometer zum Einsatz gebracht.

Biegezug- / Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte entsprechend der in der Normung vorgegebenen und bekannten Vorgehensweise, indem zunächst der Mörtel hergestellt wurde und dieser dann in die Prismenschalung eingefüllt wurde. Im Alter von 28 Tagen wurden die Prismen nach dem Drei-Punkt-Lastverfahren mit Hilfe eines Prüfgeräts nach DIN 196-1 untersucht und die Biegezugfestigkeit bestimmt.

Die bei der Biegezugfestigkeitsprüfung entzweiten Prüfprismen wurden anschließend einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen, in dem die beiden Prismenhälften nach DIN 196-1 bei gleichmäßiger Laststeigerung bis zum Erreichen der maximalen Lastaufnahme belastet wurden.

Normsteife nach DIN EN 196-3 für die Ermittlung der Packungsdichte

Die Normsteife und die Erstarrungszeit der untersuchten Zemente und Zusatzstoffe wurden mit dem Vicat-Nadelgerät entsprechend der normativ geregelten Vorgehensweise bestimmt.

Wurde die Normsteife ermittelt, kann die reale Packungsdichte c des Mineralskeletts mit nachfolgender Gleichung 3 berechnet werden:

$$c = \frac{1}{1 + \rho Bindem.* \frac{m_{wasser}}{m_{Bindem.}}}$$

<u>Zusatzmittel</u>

Bestimmung der Sättigungsdosierung mittels Trichterauslaufzeit

Die Bestimmung der Sättigungsdosierung der Zusatzmittel erfolgte mittels Mörtelversuch. Dabei wurde der Empfehlung gefolgt, den Sand und das zu untersuchende Bindemittel in einem Verhältnis von 1,6 zu mischen.

Idealerweise sollte auch ein w/z-Wert von 0,4 gewählt werden. Bei dieser Zusammensetzung wird dann von einer Fließmittelzugabe von 15 g ausgegangen.

Die Ausgangsstoffe Zement bzw. Zusatzstoff und Sand werden in ihren Zugabemengen konstant gehalten, doch wird der Fließmittelgehalt ± 2 g und das Zugabewasser variiert.

Sind die Werte ermittelt, kann mit der Mischung je Mischungsrezeptur begonnen werden. Hierbei wird zuerst das Wasser und ein Drittel des Fließmittels in den Mischer gegeben und bei langsamer Geschwindigkeit für 15 s gemischt. Anschließend wird der Zement zugegeben (t=0) und für weitere 30 s langsam gemischt. Während den 30 s wird der Sand in die Mischung beigefügt und nach Ablauf der Zeit der Mischer für weitere 30 s auf die schnellere Stufe eingestellt. Anschließend wird der Mischer für 30 s gestoppt, bevor dann das restliche Fließmittel der Mischung zugegeben und für 15 s langsam und anschließend für 105 s schnell gemischt wird.

Die so hergestellte Mörtelmischung wird anschließend in einen gereinigten und leicht angeneuchteten Marsh-Trichter gegeben. Es wird dann die Zeit gemessen, in der 500 ml des Mörtels den Trichter durchlaufen hat. Dieser Vorgang ist für jede Mischungsrezeptur zu wiederholen und die ermittelten Wertepaare Zeit/Fließmitteldosierung mit Hilfe der Software BetonLab Pro (BtlOutils) zu analysieren.

6.1.1.8 Untersuchungen zur Optimierung des Mischungsentwurfs für Fahrbahnbetone

Der Ablauf des Untersuchungsprogramms zur Durchführung der Versuchsreihen zur Optimierung der Mischungsrezeptur, wie dieses von Frau Ünal im Rahmen ihrer Masterarbeit geplant und umgesetzt wurde, ist in Abbildung 6.15 aufgezeigt.



Abbildung 6-15: Ablauf der durchzuführenden Untersuchungen, um die Mischungsrezeptur mittels Sieblinienoptimierung bzw. mittels Partikeldichteoptimierung zu verbessern

Charakterisierung /Kennwerte der Ausgangsstoffe

Für die Untersuchungen im Labor wurden die Ausgangsstoffe eines schon in der Praxis eingesetzten Fahrbahnbetons (Waschbeton) verwendet. Die eingesetzte Deckschicht entspricht hierbei den Anforderungen der TL Beton StB, mit einem Mindestzementgehalt von 420 kg/m³. Einem Wasser-Zement Verhältnis von unter 0,45, welches eine vollständige Hydratation gewährt. Auch die Anforderungen des Luftporengehalts von mindestens 5,5 Vol.-%, bei einem Größtkorn von 8 mm wurden eingehalten. Die Zusammensetzung der Ausgangsrezeptur für die in den Untersuchungen genutzte Deckschichtbeton ist in Tabelle 6.8 aufgezeigt.

Bauklassen	[-]	SV; I-III
Druckfestigkeitsklasse	[-]	C 30/37
Expositionsklassen	[-]	XC4; XD3; XF4; XM2
Feuchtigkeitsklasse	[-]	WS
Konsistenz	[-]	F2
Größtkorn [D]	[mm]	8
w/z-Wert	[-]	0,43
Zementgehalt	[kg/m³]	420
Feine Gesteinskörnung 0/4	[kg/m³]	536,5
Grobe Gesteinskörnung 5/8	[kg/m³]	1282,9
Luftporengehalt	[Vol%]	6,0

 Tabelle 6.8:
 Zusammensetzung der Komponenten der Ausgangsrezeptur für einen Waschbeton

Zudem wird im Folgenden auch die Optimierung der Betonzusammensetzung für einen Unterbeton aufgezeigt. Die Mischungszusammensetzung der betrachteten Ausgangsrezeptur ist in Tabelle 6.9 aufgezeigt.

 Tabelle 6.9:
 Zusammensetzung der Komponenten der Ausgangsrezeptur für einen Unterbeton

Bauklassen	[-]	SV; I-III
Druckfestigkeitsklasse	[-]	C 30/37
Expositionsklassen	[-]	XC4; XD3; XF4; XM2
Feuchtigkeitsklasse	[-]	WS
Konsistenz	[-]	C1
Größtkorn [D]	[mm]	22
w/z-Wert	[-]	0,43
Zementgehalt	[kg/m³]	350
Feine Gesteinskörnung 0/4	[kg/m³]	538,9
Grobe Gesteinskörnung 2/5	[kg/m³]	274,0
Grobe Gesteinskörnung 8/16	[kg/m³]	538,5
Grobe Gesteinskörnung 16/22	[kg/m³]	652,5
Luftporengehalt	[Vol%]	5,0

Gesteinskörnungen

Sieblinienberechnung - Siebturm

Die Sieblinienberechnung für die Gesteinskörnungen erfolgte zum einen den normativen Vorgaben folgend mechanisch mit dem Siebturm. Der Siebturm wurde mit einer Siebserie ausgestattet, deren Öffnungsweiten sich von oben nach unten verkleinern. Die Siebanzahl wurde je nach der Gesteinskörnungsklasse entsprechend ausgewählt und die Gesteinskörnung jeweils für 10 Minuten durchgesiebt. Anschließend erfolgte die Wägung der Siebrückstände und die Auswertung.

Die Ergebnisse der Siebanalysen sind für die Gesteinskörnungen 0/4, 2/5, 5/8, 8/16 und 16/22 in den nachstehenden Tabellen 6.10, Tabelle 6.11, Tabelle 6.12, Tabelle 6.13 und Tabelle 6.14.

Tabelle 6.10: Siebanalyse der Gesteinskörnungsklasse 0/4

Sieb-	Masse des	Siebrückstand	Siebrückstand	Siebdurchgang
Öffnungs-	Rückstandes	Ri	R	D
weite	R	(Einzelsieb)	(kumuliert)	(kumuliert)
[mm]	[g]	[M%]	[M%]	[M%]
6,0	5,0			
4,0	57,7	2,61	2,61	100
2,0	341,6	15,47	18,08	84,5
1,0	356,6	16,14	34,22	68,4
0,63	302,0	13,67	47,89	54,7
0,5	292,0	13,22	61,11	41,5
0,25	744,0	33,68	94,79	7,8
0,125	96,5	4,37	99,16	3,4
0,063	13,7	0,62	99,78	2,83
< 0,063	4,9	0,22	100	2,2
Summe	2214,0	100		

Tabelle A 1: Daten - Gesteinskörnungsklasse 0/4

Tabelle 6.11: Siebanalyse der Gesteinskörnungsklasse 0/2

Tabelle A 2: Daten - Gesteinskörnungsklasse 2/5

Sieb-	Masse des	Siebrückstand	Siebrückstand	Siebdurchgang
Öffnungs-	Rückstandes	R	Ri	D
weite	R	(Einzelsieb)	(kumuliert)	(kumuliert)
[mm]	[g]	[M%]	[M%]	[M%]
8,0	0,9	0,04	0,04	100
5,0	978,7	37,95	37,99	62,0
4,0	685,7	26,59	64,58	35,4
2,0	801,7	31,09	95,67	4,4
1,0	106,1	4,11	99,78	4,3
0,63	2,5	0,1	99,88	4,2
0,25	0,4	0,01	99,89	4,2
0,063	1,6	0,06	99,95	4,1
< 0,063	1,3	0,05	100	4,0
Summe	2578,9	100		

Tabelle 6.12: Siebanalyse der Gesteinskörnungsklasse 5/8

Sieb-	Masse des	Siebrückstand	Siebrückstand	Siebdurchgang
Öffnungs-	Rückstandes	Ri	Ri	D
weite	R	(Einzelsieb)	(kumuliert)	(kumuliert)
[mm]	[9]	[M%]	[M%]	[M%]
10,0	2	0,16	0,16	100
8,0	176,3	14,04	14,2	85,96
5,0	1047,5	83,42	97,62	2,5
4,0	20,9	1,66	99,28	1,0
3,15	4,4	0,35	99,63	0,65
2,8	1,4	0,11	99,74	0,5
2,0	1,2	0,11	99,85	0,4
1,25	1,0	0,08	99,93	0,3
0,63	0,9	0,07	100	0,2
0,125	0,1	0,0	100	0
Summe	1255,7	100		

Tabelle A 3: Daten - Gesteinskörnungsklasse 5/8

Tabelle 6.13: Siebanalyse der Gesteinskörnungsklasse 8/16

Tabelle A 4: Daten - Gesteinskörnungsklasse 8/16

Sieb-	Masse des	Siebrückstand	Siebrückstand	Siebdurchgang
Öffnungs-	Rückstandes	R	R	D
weite	Ri	(Einzelsieb)	(kumuliert)	(kumuliert)
[mm]	[g]	[M%]	[M%]	[M%]
22,4	31,9	0,8	0,8	100
16,0	620,3	15,56	16,36	84
14,0	533,8	13,4	29,76	71
10,0	1340,8	33,66	63,42	37
8,0	1024,7	25,72	89,14	11
5,0	304,7	7,65	96,79	3
4,0	27,8	0,7	97,49	2
2,8	33,8	0,85	98,34	1
0,63	61,5	1,54	99,88	0
0,125	4,6	0,12	100	0
Summe	3983.9	100		

Tabelle 6.14: Siebanalyse der Gesteinskörnungsklasse 16/22

Sieb- Öffnungs-	Masse des Rückstandes	Siebrückstand Rı	Siebrückstand Rı	Siebdurchgang D
weite	Ri	(Einzelsieb)	(kumuliert)	(kumuliert)
[mm]	[g]	[M%]	[M%]	[M%]
22,4	238,3	5,71	5,71	100
16,0	3342,2	80,11	85,82	20
14,0	474,3	11,37	97,19	9
10,0	86,8	2,08	99,27	7
8,0	4,7	0,11	99,38	7
5,0	1,4	0,04	99,42	7
4,0	0,6	0,02	99,44	7
2,8	2,1	0,05	99,49	7
0,63	10,2	0,24	99,73	6
0,125	11,2	0,27	100	5
Summe	4171,8	100		

Sieblinienanalyse mit dem Partikelmessgerät – PartAn 3D

Als Referenzmessung wurde die Korngrößenverteilung der Gesteinskornfraktionen zudem mit dem Partikelmessgerät PartAn 3D analysiert. Da bei der Siebanalyse die 3-dimensionale Projektionsfläche der Gesteinskörner erfasst werden, die beim freien Fall rotierend an der Kamera vorbeigeführt und erfasst werden, kann mit den in einer Datei abgespeicherten Daten im Weiteren eine Bildanalyse aller Körner vorgenommen werden. Die in Abbildung 6.16 dargestellten Partikelverteilung der Gesteinskornfraktion 5/8 zeigen die Kornverteilungen der Fraktion unter Heranziehung von 6 morphologisch verschiedenen Parametern von Größe und Form. Insgesamt lassen sich mit PartAn 3D insgesamt 40 morphologische Parameter in der Bewertung zugrunde legen. Hierbei können auch die Oberflächenrauigkeit, die Oberflächenspannung, die Transparenz und natürlich 3D Informationen in der Analyse zugrunde gelegt werden.



Abbildung 6-16: Graphische Siebanalyse mit PartAn 3D am Beispiel der Gesteinskörnungsklasse 5/8

Zur Information ist in Abbildung 6.17 das Messprotokoll der Untersuchung der Gesteinskörnungsklasse 5/8 aufgezeigt.

PartAn Analysis Report



Korrelationsname:Sieblinie EMMA_Basaltfaser.cor

Proben Nummer: 2

Sorte: Basalt_Gesteinskörnung_5_8 Datum/Uhrzeit:

Feld 2:

 Scale factor:
 0,063955364
 Analysis time:
 7 min. 51 s

 Kamera:
 Kamera 1
 Datum Zeit:
 01.07.2021 13:17:31

Particle Size Distribution

	1	2	3	4	5	Totals	Values
mm	D_Flach	D_Umfang	F_Läng F_	Breite F	Dicke	Item	Column #1
	,Cum< Vol %	Vol %	Vol %	Vol %	Vol %		
53	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	#1_D10 [mm]	6,63
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	#1_D50 [mm]	8,24
26,5	100,00	99,84	100,00	100,00	100,00	#1_D90 [mm]	10,08
22,4	100,00	99,63	99,50	100,00	100,00	#1_On Spec. [%]	43,51
20	100,00	99,46	99,20	100,00	100,00	#1_Sphericity < Lim(23,75
16	100,00	98,62	98,04	100,00	100,00	#1_Mean Sphericity(N	0,86
12,5	99,28	94,88	85,16	99,59	99,59	#1_T/L Ratio (3,15-1	0,66
10	89,01	64,13	39,26	97,08	97,08	#1_Total Part.	57440
8	43,55	16,69	5,37	72,92	72,92	#1_TotVol [mm3]	1962700,01
6,3	5,78	0,97	0,27	28,73	28,75	#1_5_Area [mm2]	1482782,22
	0,08	0,03	0,03	1,73	1,73	#1_S_Area/Count [mm	2 25,81
3,55	0,04	0,03	0,03	0,74	0,74	#1 S Area/TotVol[1/m	0,76
3,15	0,03	0,03	0,03	0,31	0,31	#1_Mean Compactness	\$ 0,72
2,8	0,03	0,03	0,03	0,14	0,14	#1_Mean Roundness	0,53
2,5	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	#1_Mean Circularity	0,74
2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	#1_Mean Convexity	0,99
1,8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	1.5.900 1.
1,6	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
1,4	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
1,25	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
1,18	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
0,85	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
0,8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
0,71	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03		
0,6	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03		
0.5	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03		
0,425	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03		
0,4	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03		
0,355	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03		
0,3	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03		
0.25	0,02	0.01	0.00	0.02	0,02		
0,212	0.01	0,01	0,00	0.02	0,02		
0,18	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02		
0,15	0.00	0,00	0,00	0,02	0,02		
0,125	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01		
0,106	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
90,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,075	0.00	0.00	0.00	0,00	0,00		
0,063	0.00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,053	0.00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0.045	0.00	0,00	0,00	0.00	0.00		
0,038	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Analec v	www.ana-teo	com	Sieblinie EMM	A Basaltfas	er 2 Basalt	Gesteinskörnung 5 8 2021	10701 1317

Abbildung 6-17: Graphische Siebanalyse mit PartAn 3D am Beispiel der Gesteinskörnungsklasse 5/8

Ermittlung der Rohdichte - Pyknometer

Die Rohdichte der Gesteinskornfraktionen wurden mit dem Pyknometer nach DIN EN 1097-6 bestimmt. Zudem wurde im Versuch auch die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ermittelt. Dabei wurden die abhängig des Korndurchmessers erforderlichen Mindestmaterialmessungen bei der Prüfung berücksichtigt.

Die ermittelten Trockenrohdichten, die scheinbare Rohdichte etc. wie auch die Wasseraufnahme zeigt die Zusammenstellung in Tabelle 6.15.

Körnung	CEM 42,5	KSM Easy- flow	0/4	2/5	5/8	8/16	16/22
Trockenrohdichte ρ _p [kg/dm³]	3,08	2,125	2,674	2,6798	3,05	3,03	3,06
Scheinbare Rohdichte ρ _a [kg/dm³]	-	-	2,684	2,653	3,0595	3,062	3,0885
Rohdichte auf ofentrocke- ner Basis ρ _{rd} [kg/dm³]	-	-	1,803	1,897	2,657	2,777	3,007
Rohdichte auf wasserge- sättigter und oberflächen- trockener Basis ρ _{ssd} [kg/dm³]	-	-	2,1305	2,182	2,793	2,8705	3,039
Wasseraufnahme nach 24-stündiger Eintauchzeit W ₂₄ [-]	-	-	1,8	1,5	1,5	1,3	0,87
Porosität Φ	-	-	4,813	4,0197	4,575	3,939	2,662

Tabelle 6.15: Rohdichte/W24/Porosität der untersuchten Gesteinskörnungen

Feinanteil – Auswaschversuch nach DIN EN 933 – 1

Zur Bestimmung des Feinanteils wurde die Körnung wie normativ gefordert zunächst getrocknet und dann im Wasserbad für 24 Stunden gelagert, bevor die anschließende Siebung mit dem 0,063 mm Sieb erfolgte. Die auf dem 0,063 mm Sieb verbliebenen Partikel wurden wieder getrocknet und nach der Abkühlung gewogen. Die für die untersuchten Gesteinskornfraktionen bestimmten Feinanteile sind in Tabelle 6.16 zusammengestellt.

Tabelle 6.16:	Feinanteil der einzelnen Gesteinskornklassen
---------------	--

Korngruppe	Max. Siebdurchgang durch	Max. Siebdurchgang durch das
	das 0,063 mm Sieb	0,063 mm Sieb Ausgangsrezeptur
	[M%]	[M%]
0/4	1,6	1,17
2/5	0,8	0,55
5/8	0,65	0,51
8/16	0,58	0,47
16/22	0,66	0,41

Packungsdichte

Die mit dem bereits beschriebenen LPC-Verfahren bestimmt Packungsdichte für die einzelnen Gesteinskornfraktionen sind in Tabelle 6.17 aufgezeigt.

Körnung	Höhe H₀ [cm]	Höhe h [cm]	Volumen V [cm³]	Schüttdichte ρ _a [g/m³]	Packungsdichte Φ [-]
0/4	26,5	21	4222,30	1,658	0,621
2/5	22,5	25	5026,55	1,393	0,519
5/8	27	20,5	4121,77	1,698	0,556
8/16	27	20,5	4121,77	1,698	0,56
16/22	26	21,5	4322,83	1,619	0,524

 Tabelle 6.17:
 Zusammenstellung der mit dem LPC-Verfahren bestimmten Packungsdichten

Mit: Hv = 47,5 cm; Zylinderhöhe = 60 cm und Durchmesser = 16 cm

Zemente und Betonzusatzstoffe

Partikelgrößenverteilung

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte mit dem Laserbeuger S3500, welches auf die Nutzung des Streulichts von mehreren Laserstrahlen zurückgreift, die durch einen Partikelstrom projiziert werden. Die von der Software analysierte Menge und Richtung, des von den Partikeln gestreuten Lichts ist in Abbildung 30 dargestellt.

In der Tabelle 6.18 ist einerseits der in den Untersuchungen herangezogene Zement CEM I 42,5 N sowie das für die Optimierung der Rezeptur herangezogene Kalksteinmehl KSM-Easyflow.

μm	Zement CEM 42,5 [Vol%]	KSM – Easyflow
148,0	100,00	100,00
124,5	99,54	100,00
104,7	98,8	100,00
88,00	97,56	100,00
74,00	95,47	99,67
62,23	92,13	99,22
52,33	87,30	98,61
44,00	81,20	97,78
37,00	74,68	96,71
31,11	68,06	95,39

Tabelle 6.18:Mit dem Laserbeuger S3500 erfasste Partikelgrößenverteilung des Zements und des zur Mischungsop-
timierung eingesetzten Kalksteinmehls

26,16	61,81	93,81
22,00	55,94	91,96
18,50	50,38	89,79
15,56	45,11	87,20
13,08	40,20	84,08
11,00	35,68	80,33
9,25	31,53	75,87
7,78	27,69	70,65
6,54	24,12	64,67
5,50	20,85	58,04
4,62	17,92	51,21
3,89	15,35	44,28
3,27	13,13	37,88
2,75	11,23	32,31
2,312	9,60	27,62
1,945	8,19	23,63
1,635	6,92	20,09
1,375	5,75	16,81
1,156	4,67	13,76
0,972	3,68	11,01
0,818	2,80	8,59
0,688	2,02	6,42
0,578	1,34	4,39
0,486	0,76	2,58
0,409	0,31	1,21
0,344	0,00	0,40
0,289	0,00	0,00

Bestimmung der Normsteife nach DIN EN 196-3 für die Packungsdichte

Die Bestimmung der Normsteife des Zementes CEM I 42,5 und des Zusatzstoffes KSM-Easyflow erfolgte nach DIN EN 196-3. Für die Ermittlung der Normsteife des Zementes wurden 400 g Zement und 100 g KSM-Easyflow genutzt. Für die Bestimmung der Normsteife des Kalksteinmehls wurden 100 g Zement und 400 g KSM-Easyflow zum Einsatz gebracht. Beide Versuchsreihen wurden je mit und ohne Fließmittel durchgeführt.

Die experimentelle Packungsdichte ist in Tabelle 6.19 dargestellt.

 Tabelle 6.19:
 Aus der Normsteife ermittelte Werte zur experimentellen Packungsdichte

	CEM I 42,5	KSM-Easyflow
Experimentelle Packungsdichte	0,5806	0,6206
(ohne Fließmittel)		
Experimentelle Packungsdichte	0,59686	0,6899
(mit Fließmittel)		

<u>Zusatzmittel</u>

Sättigungsdosierung mittels Trichterauslaufzeit

Die Bestimmung der Sättigungsdosierung des Fließmittels, in den Optimierungsversuchen wurde PANTARHIT- RC140 genutzt, wurde mittels Mörtelversuchen bestimmt. Dabei wurde zunächst auf das empfohlene Verhältnis bei der Ausgangsrezeptur von Sand/Bindemittel von 1,6 und auf einen idealen w/z-Wert von 0,4, geachtet. Der Fließmittelanteil betrug 15 g bei der Zementanalyse und 9 g bei der KSM-Analyse, welcher bei den darauffolgenden Rezepturen um ± 1,5 oder 2 g variiert wurde.

Die hergestellten Mörtelmischungen wurden anschließend in den Marsh-Trichter gefüllt. Anschließend wurde die Zeit gemessen, in der 500 ml des Mörtels den Trichter durchlaufen hat und den darunter befindlichen Erlenmeyerkolben befüllt hat. Dieser Vorgang wurde öfters wiederholt und die ermittelten Wertepaare von Zeit und Fließmitteldosierung mit Hilfe der Software BetonLab Pro (BtlOutils) analysiert. In Tabelle 6.20 ist die Sättigungsdosierung für den CEM I 42,5 N und in Tabelle 6.21 für das Kalksteinmehl dargestellt.



Tabelle 6.20: Sättigungsdosierung des Fließmittels für den Zement CEM I 42,5 N

Zement [g]	1066	1066	1066	1066	1066	1066
KSM-Easyflow [g]	118	118	118	118	118	118
Fließmittel [g]	7	9	11	13	15	16
Feststoffgehalt [g]	2,8	3,6	4,4	5,2	6,0	6,4
Zugabewasser [g]	442,8	441,6	440,4	439,2	438	436,8
Sand [g]	1896	1896	1896	1896	1896	1896
% Trockengehalt						
(Massenverhältnis:	0,236	0,304	0,372	0,439	0,507	0,541
Zement/Zuschlägen)						
Zeit [s]	180	120	66	44	21	53

➔ Analysierte Sättigungsdosierung aus BetonlabPro: 0,51 %

Tabelle 6.21: Sättigungsdosierung des Fließmittels für das Kalksteinmehl KSM-Easyflow

Zement [g]	878	878	878	878	878	878	878	878
KSM-Easyflow [g]	292,8	292,8	292,8	292,8	292,8	292,8	292,8	292,8
Fließmittel [g]	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12
Feststoffgehalt [g]	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8
Zugabewasser [g]	427,7	426,8	425,9	425,0	423,5	422	420,5	419,0
Sand [g]	1915	1915	1915	1915	1915	1915	1915	1915
% Trockengehalt								
(Massenverhält-	0,051	0,102	0,154	0,205	0,256	0,307	0,359	0,410
nis: Zement/Zu-								
schlägen)								
Zeit [s]	k.a.	210	75	25	100	58	21	66

➔ Analysierte Sättigungsdosierung aus BetonlabPro: 0,525 %

6.1.1.9 Untersuchte Betonrezepturen

Bei den untersuchten Betonrezepturen wurde als Ausgangsrezeptur die in Tabelle 6.8 aufgezeigte Zusammensetzung des Wachbetons und die in Tabelle 6.9 aufgezeigten Zusammensetzung für den Unterbeton angesetzt, da diese Rezepturen in der Praxis Anwendung finden und folglich auf deren Optimierungspotenzial hin untersucht wurden.

Tabelle 6.22 und Tabelle 6.23 zeigen die Ausgangsrezepturen beider Betone in der Excel-Darstellung

 Tabelle 6.22:
 Ausgangsrezeptur des Waschbetons in EXCEL-Datei dargestellt und bewertet

		Feststoffanteil [Vol%]:	75,8	Wasser [kg]	FM [kg]	Luft [l]
V61		minimaler Korndurchmesser [µm]:	0,063	182	0	60
		maximaler Korndurchmesser [µm]:	11200			
		Exponent n:	0,35			
		EMMA-Siebe [µm]:				
		Soll-Sieblinie				
Mischmenge	1	Ist-Sieblinie				
[1]		Error (Fehlerquadrate)				
1		Mittelwert (Fehlerquadrate)	64,179	den Bezug in 2	Celle C9 auf	die Korndur
Einwaage						
[g]		Material	Anteil [Vol%]	Anteil [Vol%]	Anteil [kg]	Dichte
420,00	1. Material	CEM I 42,5 N	13,55	10,27	420,00	3,1
	2. Material	feine Körnung- Sand 0/4	32,68	24,77	536,50	2,621
	3. Material	grobe Körnung Basalt 5/8	53,77	40,76	1282,90	3,086
	Summe		100,00			
182	Wasser					
0	FM	G2				
Suspension						
602,00			w/z-Wert	0,4333333333		

 Tabelle 6.23:
 Ausgangsrezeptur des Unterbetons in EXCEL-Datei dargestellt und bewertet

		Feststoffanteil [Vol%]:	79	Wasser [kg]	FM [kg]	Luft [l]
V61		minimaler Korndurchmesser [µm]:	0,063	150	0	60
		maximaler Korndurchmesser [µm]:	22400			
		Exponent n:	0,35			
		EMMA-Siebe [µm]:				
		Soll-Sieblinie				
Mischmenge	1	Ist-Sieblinie				
[1]		Error (Fehlerquadrate)				
1		Mittelwert (Fehlerquadrate)	31,824	den Bezug in 2	elle C9 auf	die Korndur
Einwaage						
[g]		Material	Anteil [Vol%]	Anteil [Vol%]	Anteil [kg]	Dichte
350,00	1. Material	CEM I 42,5 N	11,29	8,92	350,00	3,1
	2. Material	feine Körnung- Sand 0/4	25,56	20,19	538,90	2,621
	3. Material	grobe Körnung- Basalt 2/5	13,91	10,99	274,00	3,075
	4. Material	grobe Körnung- Basalt 8/16	22,82	18,03	538,50	3,022
	5. Material	grobe Körnung- Basalt 16/22	26,42	20,87	652,50	3,072
	Summe		100,00			
150	Wasser					
0	FM	G2				
Suspension						
500,00			w/z-Wert	0,428571429		



Abbildung 6-18: Kornzusammensetzung der Ausgangsrezeptur des Waschbetons mit der Software EMMA dargestellt



Abbildung 6-19: Kornzusammensetzung der Ausgangsrezeptur des Oberbetons mit der Software EMMA dargestellt

Standardmäßig wird in der Baupraxis vor Anwendung eines neuen Mischungsentwurfs die Zusammensetzung einer Erstprüfung gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 unterzogen. Hierbei werden die Ausgangsstoffe ausgewaschen und die Versuche erst danach durchgeführt. Das entspricht aber nicht den eingesetzten Ausgangstoffen in der Praxis, welche einen hohen Feinanteil besitzen. Um den Einfluss der Feinanteile in den weiteren Optimierungsversuchen zu berücksichtigen, wurden in [Ünal 2021] durchgeführten Masterarbeit vorliegenden Arbeit die Frischbetonprüfungen einmal mit ausgewaschenen Grobgesteinskörnungen und einmal mit den in der Praxis vorhandenen Feinanteilen geprüft.

Simulations						
Composition	1	Concrete n*	1			
G1 (%) 67,32	<u>B</u> atch	G1 (kg/m3)	1276,4			
S1 (%)		S1 (kg/m3)	543,2			
C1 (<u>O</u> ptimise	C1 (kg/m3)	420			
[L1 [kg/m3] 420		└ (kg/m3)	210,9			
Eff. W (kg/m3) 182		G1 (%)	67,32			
	Concrete n*1	S1 (%)	32,68			
		Eff water	182			
	Grading	Total air (%)	6			
		AEA	Yes			
	<u>F</u> illing	G/S ratio	2,35			
		└ Weff/C	0,433			
Air entraining agent?		Environment	XF4			
C No		Aggregate packing g*	0,6657			
Yes Totalair 6 % Environnement XF4 ✓		X Name of constituents				
Fixed cost		G1 mischungsentwurf.c:	st\Basalt 5/8			
		S1 mischungsentwurf.c:	st\Sand 0/4		-	
mean % of active alkali in water	0	C1 mischungsentwurf. cst\Zement CEM 42,5				
maximum % of active alkali in water	0					
	1-					

Abbildung 6-20: Darstellung der eingegebenen Daten und Parameter in BetonlabPro für den Waschbeton

Composition —			Concret	en*	1			
G1 (%)	30,42	<u>B</u> atch	G1 (kg/r	n3)	629,6			
52 (%)	26.82		G2 (kg/r	n3)	549,6			
22 (%)	10.01	Optimise	G3 (kg/r	m3)	306,4			
13 [%]	116,91		- S1 (kg/n	n3)	467,5			
1 (%)	25,85		C1 (kg/n	n3)	350	 	_	
1 (kg/m3)	350	Concrete n°1	W (kg/m	13)	175,6			
ff. W (kg/m3)	150	1	G1 (%)		30,42	 		
	1	Grading	G2 (%)		26,82			
			G3 (%)		16,91	 		
		<u>F</u> illing	S1 (%)		25,85	 	_	
			Eff water	r	150	 		
r entraining age	nt?		Total air (%)		6	 		
No			AEA		Yes	 	_	
Yes Tota	alair 6 %		G/S ratio	D	3,178	 		
		_	Weff/C		0,429	 		
nvironnement	×F4 🔻		Environ	ment	XF4	 	_	
			Aggrega	ate packing g*	0,7019			
xed cost	0		Name Name	ne of constituents				
nean % of active	alkali in water	0						
naximum % of act	ive alkali in water	0	G1	mischungsentwurf.cs	\Basalt 16/22			
			G2	mischungsentwurf.cs	t\Basalt 8_16			
onfinement: No			G3	mischungsentwurf.cs	\Basalt 2_5			
			S1	mischungsentwurf.cs	\Sand 0/4			
			C1	mischungsentwurf.cs	Zement CEM 42,5			

Abbildung 6-21: Darstellung der eingegebenen Daten und Parameter in BetonlabPro für den Unterbeton

Optimierte Betonrezeptur

Zur Optimierung der Betonrezeptur wurde eine sieblinienoptimierte und eine packungsdichteoptimierte Verbesserung der Rezeptur vorgenommen.

Sieblinienoptimierung der Betonrezeptur

Wie bereits ausgeführt, wird die sieblinien-optimierte Mischungsuntersuchung derart vorgenommen, dass eine Sollsieblinie erarbeitet wird, welche die perfekte Partikelpackung nach dem modifiziertem Andreassen Modell darstellt und mit der Ist-Sieblinie verglichen wird. Mit der rechnerischen Ermittlung der Differenz beider Sieblinien kann so eine Verbesserung vorgenommen werden, in dem die Summe aller Fehlerquadrate minimiert wird (vgl. Abweichungen der Soll- und Ist-Sieblinien der Abbildung 6-18 (Waschbeton) und Abbildung 6-19 (Unterbeton).

Die Abweichung lässt sich auch graphisch analysieren. Liegt die Ist-Sieblinie oberhalb der Soll-Sieblinie, ist zu viel Material dieses Korngrößenbereiches vor. Liegt die Ist-Sieblinie unterhalb der Soll-Sieblinie, ist zu wenig Material in diesem Korngrößenbereich vorhanden. Durch Veränderung des zuzugebenden Anteils der einzelnen Kornfraktionen kann ein Ausgleich geschaffen werden und eine Annäherung an die Soll-Sieblinie erzielt werden. Die sieblinien-optimierte Mischungsanpassung wurde im Rahmen des Vorhabens Betonfahrbahn 4.0 von Frau Ünal mit einer Excel-Datei umgesetzt, welche zum einen eine rechnerische Ermittlung der Anpassung der Anteile der einzelnen Kornfraktionen ermöglichte. Mit Hilfe der EMMA-Software konnte dann die graphische Analyse der optimierten Mischung vorgenommen werden.

Excel-Datei

In der Excel-Datei wurde ein Verteilungsmodul von 0,35 angesetzt. Dieser wird in der Literatur für erdfeuchte Betone genutzt, welche eine erhöhte Grünstandfestigkeit aufweisen und eine Reduzierung des Wasseranteils bei der Betonherstellung ermöglichen soll.

Um den Klinkeranteil nicht zuletzt auch mit Blick auf die Themen Ressourcenschonung und Klimaschutz zu reduzieren, wurde in [Ünal 2021] der geforderte Mindestzementgehalt wie folgt aus einer Kombination aus Zement und Kalksteinmehl angeasst:

- Oberbeton von 420 kg/m³ → 280 kg/m³ CEM I und 140 kg/m³ Kalksteinmehl Easyflow
- Unterbeton von 350 kg/m³ → 234 kg/m³ CEM I und 116 kg/m³ Kalksteinmehl Easyflow

Um den Wasseranteil zu begrenzen, wurde zudem ein Fließmittel in der Größenordnung von 0,5 kg hinzugegeben, so dass sich ein w/z- Wert unter dem angefordertem w/z-Wert von \leq 0,45 wie folgt ergibt:

- Oberbeton: Wasseranteil von 182 kg auf 150 kg w/z-Wert = 0,4
- Unterbeton: Wasseranteil von 150 kg auf 130 kg w/z-Wert = 0,41

Im EXCEL-Programm wurden die mit dem PartAn 3D analysierten Sieblinien hinterlegt. Da die mechanisch mit dem Siebturm ermittelten Sieblinien nur eine bestimmte Anzahl von Sieben aufnimmt und die granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen nicht berücksichtigt werden, wurde in [Ünal im Rahmen ihrer Bachelorarbeit [5] erstellten EXCEL-Makros eine Optimierung der Kombination der einzelnen Ausgangsstoffkomponenten vorgenommen und das geringstmögliche mittlere Fehlerquadrat für die insgesamt 626 Kombinationsmöglichkeiten gesucht.

Hiernach wurden die von den Makros ausgegebenen Daten mit der Solver-Einstellung überprüft. Zunächst wurden alle Fehlerquadrate mit einem Wert unter 40,0 gefiltert, um schließlich die bestmögliche Mischungsrezeptur herausarbeiten zu können. In Abbildung 6-22 ist die mit dem EXCEL-Programm optimierte Mischungsrezeptur für den Waschbeton aufgezeigt. Es zeigt sich, dass das Fehlerquadrat einen Wert unter 40 aufweist. In der EXCEL-Darstellung der Ausgangsrezeptur lässt sich in Abbildung 33 ein Wert für das Fehlerquadrat in Höhe von 64, 176 für den Waschbeton feststellen.

		Feststoffanteil [Vol%]:	78,95	Wasser [kg]	FM [kg]	Luft [I]
V61		minimaler Korndurchmesser [µm]:	0,063	150	0,5	60
		maximaler Korndurchmesser [µm]:	22400			
		Exponent n:	0,35			
		EMMA-Siebe [µm]:				
		Soll-Sieblinie				
Mischmenge		Ist-Sieblinie				
[1]		Error (Fehlerquadrate)				
1		Mittelwert (Fehlerquadrate)	37,799	den Bezug in Zell	e C9 auf die K	orndurchme
Einwaage						
[g]		Material	Anteil [Vol%]	Anteil [Vol%]	Anteil [kg]	Dichte
280,01	1. Material	CEM I 42,5 N	11,52	9,09	280,01	3,08
140,00	2. Material	KSM Easyflow	8,35	6,59	140,00	2,125
527,78	3. Material	feine Gesteinskörnung Sand 0_4/F_Breite	25,00	19,74	527,78	2,674
1327,76	4.Material	grobe Gesteinskörnung Basalt 5_8/D_Umfang	55,14	43,53	1327,76	3,05
	Summe		100,00			
150	Wasser					
0,5	FM	G2				
Suspension			Faktor HS/PZ	1		
430,51			w/b-Wert	0,397875425		

Abbildung 6-22: EXCEL-Darstellung der sieblinienoptimierten Mischungsrezeptur für den Waschbeton

1					
		Feststoffanteil [Vol%]:	80,95	Wasser [kg]	FM [kg]
V61		minimaler Korndurchmesser [µm]:	0,063	130	0,5
		maximaler Korndurchmesser [µm]:	22400		
		Exponent n:	0,35		
		EMMA-Siebe [µm]:			
		Soll-Sieblinie			
Mischmenge		Ist-Sieblinie			
[1]		Error (Fehlerquadrate)			
1		Mittelwert (Fehlerquadrate)	18,675	den Bezug in Zell	e C9 auf die K
Einwaage					
[g]		Material	Anteil [Vol%]	Anteil [Vol%]	Anteil [kg]
233,99	1. Material	CEM I 42,5 N	9,39	7,60	233,99
116,01	2. Material	KSM Easyflow	6,74	5,46	116,01
541,15	3. Material	feine Gesteinskörnung Sand 0_4/F_Dicke	25,00	20,24	541,15
	4.Material	grobe Gesteinskörnung Basalt 2_5/F_Breite	28,99	23,47	628,95
	5.Material	grobe Gesteinskörnung Basalt 8_16/F_Dicke	15,10	12,23	327,62
	6.Material	grobe Gesteinskörnung Basalt 16_22/F_Breite	14,78	11,96	320,52
[Summe		100,00		
130	Wasser				
0,5	FM	G2			
Suspension			Faktor HS/PZ	1	
364,49			w/b-Wert	0,413706814	

Abbildung 6-23: EXCEL-Darstellung der sieblinienoptimierten Mischungsrezeptur für den Unterbeton

Der Abbildung 6.23 lässt sich entnehmen, dass mit der EXCEL-basierten Minimierung des Fehlerquadrats eine günstigere Situation als für die Ausgangsrezeptur der Unterbetonmischung erzielt werden konnte.

EMMA

Mit der EMMA-Software können die Sieblinien und Rohdichten aller in einer Rezeptur zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffe in der Datenbank der Software hinterlegt werden. Auch für die Analyse mit EMMA wurde ein Verteilungsmodul von 0,35 angesetzt und das Kalkulationsmodell ,,modifizierte Andreassen" eingestellt.

Die Aufteilung des Zementgehalts wie auch des Wassergehalts wurde gleich wie in der zuvor aufgezeigten EXCEL-Dateien basierten Optimierung vorgenommen. Die Optimierung mit der EMMA-Software lässt sich anhand der grafischen Darstellung des Unterschieds zwischen Soll- & Ist-Sieblinie darstellen. Die Soll-Sieblinie, in Rot gekennzeichnet, stellt die perfekte Partikelverteilung basierend auf dem Andreasen-Modell dar. Die blaue Linie, die durch einen unregelmäßigen Verlauf gekennzeichnet ist, zeigt demgegenüber die Verteilung der Partikel über den gesamten Größenbereich der im Gemisch zum Einsatz kommenden Partikel.



Abbildung 6-24: Mit der Software EMMA sieblinienoptimierter Mischungsentwurf für den Waschbeton



Abbildung 6-25: Mit der Software EMMA sieblinienoptimierter Mischungsentwurf für den Unterbeton

Liegt die blaue Ist-Linie oberhalb der roten Soll-Linie, ist zu viel Material in diesem Korngrößenbereich einkalkuliert. Eine Unterschreitung bedeutet, dass zu wenig Material dieses Korngrößenbereichs im Gemisch gegeben ist.

Es zeigt sich, dass sich bei der Excel-Datei und bei der EMMA-Software fast identische Mischungsrezepturen ergeben. Dies ist auf die Vorgabe des Zement- und Kalksteinmehlgehalts zurückgeführt werden. Zudem wurde der Wassergehalt vorgegeben.

Wird die graphische Analyse aus der EMMA-Software betrachtet, weichen die Gesteinskörnungsgrößen durch die fixen Werte der Zement und KSM deutlich im unteren Bereich < 100 μ m ab, wobei die Ist-Sieblinien > 100 μ m nahezu der Soll-Sieblinie gleichen.

Packungsdichteoptimierung der Betonrezeptur

Im Rahmen des Vorhabens wurde für die packungsdichteoptimierte Mischungsentwicklung der beiden Rezepturen die Software BetonlabPro zum Einsatz gebracht. Der Software liegt ein in wissenschaftlichen Arbeiten herausgearbeitetes "granulares Stapelmodell" zugrunde, das auch "Compressible Staching Model (CSM)" genannt wird, um die Kompaktheit von mehrdimensionalen Scheiben, die granulare Verteilung des Systems und die während der Mischung zugeführte Energie bei der Analyse mitzuberücksichtigen. Das CSM stütz sich auf die Konzepte der virtuellen Packungsdichte und des Verdichtungsindex ab.

Die virtuelle Packungsdichte wird von der Software betrachtet und kommt dem maximalen Feststoffvolumen, das bei einer exakten Weisung der Einzelpartikel anhand eines max. Energieeintrags erzielt wird, gleich. Um diese virtuelle Packungsdichte einer Mischung mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen berechnen zu können, wird der feine Kornbereich einer Fraktion als dominierend gesehen, da diese die Hohlräume der gröberen Fraktionen ausfüllen müssen. Das dadurch erhöhte Verhältnis vom Feststoff- zum Gesamtvolumen entspricht der virtuellen Packungsdichte. Die virtuelle Packungsdichte lässt sich aber allein mit einer Homogenisierung aller Ausgangsstoffe im Mischer nicht erzielen, weshalb die reale Packungsdichte niedriger ausfällt.

Der Verdichtungsindex drückt den erforderlichen Energieeintrag in das Gemisch aus, mit dem das Verhältnis eines bestehenden Fraktionsvolumen zum möglichen Maximalvolumen dieser Fraktion bei konstantem Volumen der weiteren Fraktionen ermittelt wird. Um eine Annäherung der realen Packungsdichte an die virtuelle Packungsdichte zu ermöglichen, steigt der Energieeintrag, der erforderlich ist, um den steigenden Feststoffvolumen zu kompensieren.

Abhängig der Wahl und Festlegung des Verdichtungsindexes lässt sich die Unstimmigkeit zwischen realer und virtueller Packungsdichte berechnen. Die Software schlägt daher einen Verdichtungsindex für die Ausgangsstoffe und das Bindemittel vor, die im Untersuchungsrahmen des CPMs auf experimentell erprobter Grundlagen festgelegt wurde.

BetonLabPro

Werden alle in den zuvor beschriebenen Experimenten bestimmten Messreihen und Daten, wie Sieblinie, Rohdichte, Wasseraufnahme nach 24-stündiger Eintauchzeit, Sättigungsdosierung als auch die experimentelle Packungsdichte der jeweiligen Ausgangsstoffe in die Datenbank eingepflegt, kann die Software die virtuelle Packungsdichte aller Fraktionen bestimmen. Mit den in der Datenbank hinterlegten Materialinformationen lässt sich dann ein optimierter Mischungsentwurf bestimmen. Hierbei wurden folgende Nebenbedingungen für den Mischungsentwurf des Ober- und Unterbetons festgesetzt:

- w/z ≤ 0,45; mind. Luftgehalt = 6%; Verdichtungsindex K ≤ 14; Absenkungen zwischen 20 bis 50 cm; Fließmittegehalt ≤ 1,0 kg/m³
- Oberbeton: Zementgehalt = 280 kg/m³; Kalksteinmehlgehalt = 140 kg/m³
- Unterbeton: Zementgehalt = 234 kg/m³; Kalksteinmehlgehalt = 116 kg/m³

Als Zielgröße wurde die Packungsdichte festgelegt, wobei die beiden Mischungsrezepturen für den optimierten Oberbeton (Waschbeton) und den optimierten Unterbeton in den Abbildungen 6.26 und Abbildung 6.23 in Spate 2 (innerhalb des roten Rechteckrahmens) von der Software ermittelt wurden.

Die Berechnungsergebnisse verdeutlichen, dass die einzelne Gesteinskornfraktion in der ausgegebenen Mischung umso mehr enthalten ist, je höher die Packungsdichte dieser Gesteinskörnung ist.

Simulations					_	0	3
Composition		Concrete n*	1	2			_
G1 (%) 48,19	<u>B</u> atch	G1 (kg/m3)	808,8	974,4			
S1 (%) S1 91		S1 (kg/m3)	1063,6	918,4			
	<u>O</u> ptimise	C1 (kg/m3)	280	280			
[CT (kg/m3) [280		LFil1 (kg/m3)	140	140			
LFil1 (kg/m3) 140		SP1 (kg/m3)	0,7	0,7			
SP1 (%) 0,1	Concrete n*2	W (kg/m3)	150,9	150,7			
Eff. W (kg/m3) 120		G1 (%)	40	48,19			
1	Grading	S1 (%)	60	51,81			
		Saturation amount (%)	0,77	0,77			
	<u>F</u> illing	Superplasticizer content (%)	0,1	0,1			
		Effwater	120	120			
Air entraining agent?		Total air (%)	6	6			
C No		AEA	Yes	Yes			
🛈 Yes 🛛 Total air 🛛 🕅	6 %	G/S ratio	0,76	1,061			
[Weff/C	0,429	0,429			
Environnement XF	-4 ▼	Environment	XF4	XF4			
		Aggregate packing g*	0,689	0,6934			
Fixed cost 0							
200 10 10 10							
The of constituents							
G1 mischungser	ntwurf.cst\Basalt 5/8						
S1 mischungser	ntwurf.cst\Sand 0/4						
C1 mischungser	ntwurf.cst\Zement CEM 42,5						
LFil1 mischungsei	ntwurf.cst\KSM Easyflow						
SP1 mischungser	ntwurf.cst\Pantarhit RC140						
•	•						
							•

Abbildung 6-26: Mischungsentwurf für den Oberbeton (Spalte 1), mit BetonLabPro optimiert (Spalte 2)

Der Luftporengehalt wird in die tabellarische Listung nicht aufgenommen, sondern separat wie folgt berechnet:

$$LP - Gehalt = \frac{erford. \ Luftgehalt}{100} * \frac{Zementgehalt}{Feststoffkonzentration} [kg/m^3]$$

Daraus ergibt sich für den Oberbeton ein LP-Gehalt von 0,56 kg/m³ und für den Unterbeton von 0,468 kg/m³.

Arbeitsschwerpunkt B – Schlüsselinnovationen für prozesssichere Teilschritte

🔆 Simula	ations								•	83
Compos	sition		1	Concrete n*	1	2				
G1 (%)		47,68	<u>B</u> atch	G1 (kg/m3)	434	1034,9				
G2 (%)		10.1		G2 (kg/m3)	429,8	216,9				
02 (%)			<u>O</u> ptimise	G3 (kg/m3)	190	0				
G3 [%]				S1 (kg/m3)	948,2	800,7				
S1 (%)		42,22		C1 (kg/m3)	234	234				
C1 (kg/	'm3)	234	Concrete n°2	LFil1 (kg/m3)	116	116				
LFil1 (ke	g/m3)	116		SP1 (kg/m3)	0,59	0,58				
CD1 (%)		0.1	Grading	W (kg/m3)	128,9	125,9		 		
J3F1 [26]	,	10,1		G1 (%)	20	47,68		 		
Eff. W (kg/m3)	100	<u>F</u> illing	G2 (%)	20	10,1		 		
				G3 (%)	10	0		 		
Air entra	aining agent	?		S1 (%)	50	42,22		 		_
IC NO				Saturation amount (%)	0,77	0,77		 		
Yes	Total	air 6 %		Superplasticizer content (%)	0,1	0,1		 		
				Eff water	100	100		 		
Environ	nement	×F4 💌		l otal air (%)	6	6		 		<u> </u>
				AEA	Yes	Yes	_	 		——
is Name	of constitu	uents		G/S ratio	1,111	1,503		 		
				En increant	0,427	0,427		 		
G1	mischu	ngsentwurf.cst\Ba	asalt 16/22	Aggregate packing a*	0 71 27	0.7379		 		
, G2	mischu	ngsentwurf.cst\Ba	asalt 8_16	Aggregate packing g	0,7137	0,7370				
G3	mischungsentwurf.cst\Basalt 2_5		asalt 2_5	-						
S1	mischungsentwurf.cst\Sand 0/4		and 0/4	-						
C1	mischungsentwurf.cst\Zement CEM 42,5		-							
LFil1	mischungsentwurf.cst\KSM Easyflow									
SP1	mischungsentwurf.cst\Pantarhit RC140									
L										•

Abbildung 6-27: Mischungsentwurf für denUnterbeton (Spalte 1), mit BetonLabPro optimiert (Spalte 2)

Gegenüberstellung der beiden Ausgangsrezepturen mit den optimierten Mischungsrezepturen

In den nachstehenden Darstellungen sind die sieblinienoptimierten Mischungsrezepturen für den Waschbeton und den Unterbeton in Tabelle 6.24 und die packungsdichteoptimierten Mischungsrezepturen in Tabelle 6.25 zusammengestellt.

Da bei den sieblinienoptimierten Mischungsoptimierungen mit dem in [Ünal 20in ihrer Bachelorarbeit ausgearbeiteten EXCEL-Programm nahezu identische Ergebnisse wie mit der EMMA-Software herauskommen, wurde auf eine gesonderte Darstellung verzichtet.

Tabelle 6.24:	Gegenüberstellung der Fehlerquadrate der Ausgangsrezeptur und der Fehlerquadrate der sieblinien-
	optimierten Mischungsrezeptur für den Unter- und Oberbeton

	Ausgangsrezeptur	Sieblinienoptimierter Mischungsrezeptur
Fehlerquadrate Oberbeton	64,179	37,799
Fehlerquadrate Unterbeton	31,824	18,675

Tabelle 6.25:Gegenüberstellung der Fehlerquadrate der Ausgangsrezeptur und der Fehlerquadrate der packungs-
dichteoptimierten Mischungsrezeptur für den Unter- und Oberbeton

	Ausgangsrezeptur	Packungsdichteoptimierter Mischungsrezeptur
Packungsdichte g* Oberbeton	66,57	69,34
Packungsdichte g* Unterbeton	70,19	73,78

6.1.1.10 Vergleich des Frischbetonverhaltens von Ober- und Unterbeton in der Ausgangszusammensetzung und mit sieblinien- und packungsdichteoptimierten Mischungsrezepturen

Um die Auswirkungen der gegenüber der Ausgangsrezeptur optimierten Mischungsrezepturen hinsichtlich des Frischbetonverhaltens zu vergleichen, wurden abhängig der Lage der Betonschicht (Ober- bzw. Unterbeton), der Optimierungsart (sieblinien- bzw. packungsdichteoptimierte Mischungsrezeptur und des Zustands der Gesteinskörnungen (gewaschen und feinstofffrei bzw. ungewaschen und feinstoffreich) eine Reihe an Parameterstudien experimentell durchgeführt, so dass die Darstellung der Ergebnisse eine entsprechend eindeutige Indizierung der Betone erforderte:

- OB [s],f = Oberbeton [sieblinienoptimiert], feinanteilhaltig
- UB [s],f = Unterbeton [sieblinienoptimiert], feinanteilhaltig
- OB [p],f = Oberbeton [packungsdichteoptimiert], feinanteilhaltig
- UB [p],f = Unterbeton [packungsdichteoptimiert], feinanteilhaltig
- OB [s],a = Oberbeton [sieblinienoptimiert], ausgewaschen
- UB [s],a = Unterbeton [sieblinienoptimiert], ausgewaschen
- OB [p],a = Oberbeton [packungsdichteoptimiert], ausgewaschen
- UB [p],a = Unterbeton [packungsdichteoptimiert], ausgewaschen

Mischregime der Betonherstellung

Die einzelnen Straßenbetonmischungen wurden im Einwellenmischer bei Temperaturen zwischen 20 °C und 22 °C im Labor hergestellt. Auch die Temperatur der Ausgangsstoffe befand sich auf diesem Temperaturniveau, da die Gesteinskörnungen wie auch das Wasser im Labor gelagert wurden.

Die Herstellung im Einwellenmischer erfolgte derart, dass zunächst die feinen Bestandteile, also der Zement, das Kalksteinmehl wie auch der Sand trocken über eine Dauer von 60 Sekunden vermischt wurden, bevor dann das Anmachwasser zugegeben wurde. Der Nassmischvorgang erfolgte über ca. 70 Sekunden. In dieser Zeit wurde auch das Fließmittel und der Luftporenbildner zugegeben. Anschließend wurde die grobe Gesteinskörnung dem Gemisch zugeführt und für weitere 30 Sekunden vermischt. Nachfolgend erfolgte eine Ruhepause für 300 s, welche den Zeitraum zwischen Betonherstellung (Zeitpunkt t_{Beginn}: ab der Zugabe der Zusatzmittel FM + LP) und Betoneinbau (Zeitpunkt t_{Ende}: Beendigung der Ruhepause) in der Praxis nachbilden soll.

Nach der Beendigung der Ruhepause und einem kurzzeitigem Betonaufmischen von ca. 10 s wurden die normierten Anforderungen an den Frischbeton gemäß der TP Beton-StB 10 überprüft:

- Frischbetontemperatur laut DIN EN 12350-1
- Verdichtungsmaß zur Bestimmung der Konsistenz nach DIN EN 12350-4
- Rohdichte gemäß DIN EN 12350-6
- Luftporengehalt entsprechend DIN EN 12350-7

Frischbetoneigenschaften

In Tabelle 6.26 sind die im Rahmen der Frischbetonanalyse erfassten Frischbetoneigenschaften zusammengefasst.

Be-	Frischbeton-	Frischbetonroh-	LP-	Verdichtungs-	Konsistenz-
ton	temperatur	dichte	Ge-	maß	klasse
			halt		
L1	I°C1	[ka/m³]	[Vol	LI	LI
[]	[9]	[kg/m]	%]	[]	[]
OB	21,2	2.578	3,4	1,31	C1
[s],f					
UB	21,2	1.923	3,1	1,41	C1
[s],f					
OB	21,0	2.491	4	1,44	C1
[p],f					
UB	21,3	2.463	3,4	1,4	C1
[p],f					
OB	21,1	2.458	3,9	1,42	C1
[s],a					
UB	21,1	1.982	4	1,37	C1
[s],a					
OB	21,2	2.438	4,6	1,45	C1
[p],a					
UB	21,1	2.510	3,9	1,34	C1
[p],a					

 Tabelle 6.26:
 Gegenüberstellung der Frischbetoneigenschaften der hergestellten Fahrbahndeckenbetone

Eine Gegenüberstellung der bei den hergestellten Frischbetonen festgestellten Luftporengehalte und Verdichtungsmaße zeigt Abbildung 6.28.

Die Luftporengehalte verdeutlichen, dass die gewählte Zugabe des Luftporenbildners in Höhe von 0,20 M.-% im Oberbeton und von 0,17 M.-% im Unterbeton bezogen auf den Zementgehalt z = 280 kg/m³, sowohl im packungsdichteoptimierten als auch im sieblinienoptimierten Mischungsrezepturen zu gering waren und folglich die in der TL Beton-StB 07 genannten Luftporengehalte von 6,0 Vol.-% unterschritten wurden. Nach Beendigung der Ruhepause und einem kurzzeitigen Aufmischen wurden Werte zwischen 3,1 Vol.-% und 4,6 Vol.-% ermittelt (vgl. Tabelle 6.27). Die gemessene Werte verdeutlichen, dass die Mischungsrezepturen mit feinanteilhaltigen Gesteinskörnungen schlechtere LP-Werte von 0,5 Vol.-% bis 0,9 Vol.-% der ausgewaschenen Gesteinskörnungen aufweisen.



Abbildung 6-28: Luftporengehalte und Verdichtungsmaße der hergestellten Straßendeckenbetone sowie die Toleranzbereiche der Kennwerte (gestrichelt)

Tabelle 6.27:	Luftporengehalte d	der Fahrbahndeo	kenbetone

	Oberbeton- LP-Gehalt [%]	Unterbeton- LP-Gehalt [%]
Sieblinienoptimiert	3,4	3,1
(Feinanteilbeständig)		
Sieblinienoptimiert	3,9	4
(ausgewaschen)		
Packungsdichteoptimiert	4	3,4
(Feinanteilbeständig)		
Packungsdichteoptimiert	4,6	3,9
(ausgewaschen)		

Die durchgeführten Versuche haben folglich gezeigt, dass die sieblinienoptimierten, wie die packungsdichteoptimierten Mischungsrezepturen in Bezug auf den veränderten Zementgehalt und den Einsatz von Fließmittel im Toleranzbereich des Verdichtungsmaßes zwischen 1,26 bis 1,45 lagen und somit der Konsistenz C1 entsprachen. Der ideale Luftporengehalt von 6,0 Vol.-% wurde von keiner Mischungsrezeptur erreicht. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass die Mischungsrezepturen, wenn die Ausgangsstoffe ausgewaschen wurden, den Grenzwert nach RVS 08.17.02 von 4,0 Vol.-% oder drüber erreichten. Die Mischungsrezepturen mit feinanteilbeständigen Ausgangsstoffen hingegen erreichten diesen Grenzwert nicht.

In künftigen Untersuchungen soll auf den in Arbeitspaket B1.1 erzielten Ergebnissen aufgebaut werden, um mit weiteren stofflichen Optimierungen durch den Einsatz der packungsdichteoptimierten Mischungsrezeptur und einer besseren Abstimmung der Zugabemenge des Luftporenbildners die Anforderungen der in der TL Beton-StB 07 genannten Luftporengehalte zielsicher zu erfüllen.

6.1.2 B1.2 - Optimierung des Antriebsstranges der rheologischen Mischprozessführung

Die Optimierung des Antriebsstranges wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der Fa. CAVEX, Fa. Liebherr, dem IWB und ISYS durchgeführt. Es wird von der Fa. CAVEX ein neues Getriebe entwickelt, das in einem ersten Prototyp für die im Technikum der Universität aufzustellenden Compactmix Mischanlage der Fa. Liebherr, die mit einem Doppelwellenmischer DW 1,25 ausgerüstet ist, verbaut und in seiner Wirkung und Leistungsfähigkeit unter realmaßstäblichen Herstellbedingungen erprobt. Anstelle des serienmäßigen 45 kW Motors kommt in der Technikumsanlage ein Servomotor mit 75 kW zum Einsatz, der die beiden Mischwellen des Doppelwellenmischers antreibt. Hierbei wird zudem ein Sensor verbaut, der berührungslos das an der Mischerwelle anliegende Drehmoment aufzeichnet. Zudem wird zur weiteren Aufzeichnung der am Mischer wirkenden Kräfte ein Lastmessbolzen verbaut. Die Steuerung der Anlage und Aufzeichnung der Messwerte wird in Zusammenarbeit der vier Beteiligten umgesetzt.



Abbildung 6-29: Funktionsstrukturdiagramm für ein Schwerlastservogetriebe.

Im Rahmen der Optimierung des Getriebes für die rheologiebasierte Mischprozessführung müssen folgende Aspekte im weiteren Verlauf des Projektes systematisch erarbeitet und analysiert werden:

- Wirkungsgrad
- Reproduzierbarkeit
- langsame Drehzahlen
- gleichmäßige Kraftübertragung

Des Weiteren muss eine Optimierung des Antriebes durchgeführt werden, um konstante Drehzahlen, insbesondere in niedrigem Drehzahlbereich, reproduzierbar einstellen zu können. Im Zuge des Konzeptionierungsprozesses wurde ein detailliertes Funktionsstrukturdiagramm erstellt. Das Funktionsstrukturdiagramm (Abbildung 6.29) dient der Erfassung aller relevanten Haupt- und Nebenfunktionen des Doppelwellenmischerantriebs mit einem Schwerlastservogetriebe.

Der Ansatz zur Lösung des Problems ist eine direkte Messung. Die optimale Wiedergabe des Ist-Zustands würde sich mit einer Messung an den Mischerpaddeln ergeben.

An den realen Versuchsmischern werden die Betriebsdaten im Bereich des Antriebsstrangs erfasst. Es wird die Reaktionskraft des Getriebegehäuses bei der Abstützung am Mischerrahmen aufgenommen. Für die Aufnahme der Reaktionskraft wird ein Lastmessbolzen in die Pendelstütze der Drehmomentabstützung implementiert. Mit der Reaktionskraft am Gehäuse kann auf das Abtriebsmoment geschlossen werden.

Weiter wird die Verwindung der Getriebeabtriebswelle mit einem magnetoresistiven Sensor (Abbildung 6.30) detektiert. Mit dem Grad der Verwindung der Abtriebswelle kann ebenfalls auf das Abtriebsmoment des Getriebes und damit auf das Antriebsmoment der Mischerwellen geschlossen werden. Prinzipiell könnte der magnetoresistive Sensor auch direkt an der Mischerwelle angebracht werden. Da sich als Wellenmaterial für diese Messung nur bestimmte Materialien eignen und die Mischerwellen schon existieren, wird die Getriebeabtriebswelle verwendet. Zur Messung könnte ebenfalls die Antriebswelle dienen, hier müsste jedoch beim Schließen auf das Getriebeabtriebsmoment der exakte Getriebegesamtwirkungsgrad berücksichtigt werden. Bei der Messung an der Getriebeabtriebswelle entsteht lediglich eine Unschärfe durch die Wirkungsgradverluste an der antriebsseitigen Mischerwellenlagerung und deren Abdichtung mit zwei Radialwellendichtringen.



Abbildung 6-30: Magnetoresistiver Sensor der Firma Torque and More GmbH.

Als weitere Form der Aufnahme von Daten könnte man sich ebenfalls vorstellen, die Aufnahme der Lagerkraft. Über die Lagerkraft lässt sich auf das Abtriebsmoment schließen, jedoch ebenfalls nicht ohne Unschärfe im Bereich der entstehenden Verlustleistungen.

Das Abtriebsdrehmoment wird in Abhängigkeit der laufenden Prozesszeit detektiert. Die Aufnahme der Daten des magnetoresistiven Sensors wird in die Steuerung der Firma Liebherr implementiert. Die Datenaufnahme kann auch Stand-Alone erfolgen durch den Anschluss an einen PC mit der entsprechenden Software. Das gleiche trifft auf die Auswertung der Daten des Lastmessbolzens in der Drehmomentstütze zu.

Mit Hilfe dynamischer Drehzahlanpassungen kann der Mischprozess durch die Anpassung der Drehzahl während des Mischprozesses optimieren werden. Anhand von Referenzmessungen wird hierbei ein auf der Leistungsmessung basierender optimierter Mischprozess entwickelt.



Abbildung 6-31: Vorgehen zur Berechnung und Interpolation des Leistungssignals. Die Leistungsmessung einer Charge (I) wird gemessen, eine Interpolierte Referenzkurve erstellt (m) und diese mit simulierten Kurven verglichen (r)



Abbildung 6-32: Optimierte Mischprozessführung für unterschiedliche Strategien, Verschleißoptimiert (I), Leistungsoptimiert (r)

Auf diese Art können unterschiedliche Optimierungsziele erreicht werden:

- Verschleißoptimierung bei gleichbleibender Anlagenleistung
 - o Gleiche Anlagenleistung
 - Verringerter Verschleiß um 18%
- Optimierung der Ausstoßleistung
 - o Maximierung der Mischer Leistung
 - Steigerung der Anlagenleistung um bis zu 25%

Die hier dargestellten Ergebnisse basieren auf Simulationen des Mischprozesses. In den Simulationen zeigt sich das für das Entleeren eine deutlich reduzierte Drehzahl im Anfang des Entleerprozesses von Vorteil ist, diese wird zum "Ausräumen" am Ende des Prozesses gesteigert.

6.1.2.1 Konzeptansatz zur rheologiegeführten Mischprozessführung

Die konzeptuelle Idee eines rheologiegeführten Mischprozesses, streift bei ihrer Umsetzung u.a einige Aspekte aus der Theorie der Regelung elektrischer Antriebe.

Bei der Behandlung solch komplexer Anlagensysteme ist es zweckmäßig, die funktionalen Einheiten des Gesamtsystems strukturell zu ordnen, um ferner ihr Zusammenwirken, Dynamikverhalten sowie ihre eigentlichen Funktionen soweit zu formalisieren, dass die Implementierung von Regelstrategien zum Zweck einer Umsetzung der rheologiegestützten Mischführung, möglichst modellbasiert erfolgt.



Abbildung 6-33: Prinzipielle Regelstruktur eines Antriebsstrangs zur Umsetzung der rheologiegestützten Mischprozessführung

Die funktionalen Einheiten der hierarchisch übergeordneten Ebene sind hierbei:

- Einheiten für die Umwandlung elektromechanischer Energie elektrische Maschinen
- Transformatirische Einheiten für die Bereitstellung elektrische Größen Strom/Umrichter
- Einheiten zur Bereitstellung relevanter Zustandsgrößenverläufe Sensoren
- Kommunikationseinheiten zur Führung, Überwachung und Regelung Leitsystem

Diese Auflistung dient abhängig des Fortschritts des jeweils aktuellen Bearbeitungsfortschritts für diesen und nachfolgende Berichte rahmengebend. In diesem Bericht sollen die Gesamtproblematik und die laufenden Arbeiten unter dem Aspekt der Schnittstellenkommunikation beleuchtet werden. Eine erfolgreiche Konfigurierung eines Leitsystems auf Softwareebene zum Austausch von Prozess- und Maschinendaten stellt einen prinzipiellen Schlüsselschritt dar und bedingt weitere Schritte dahingehend, als dass sich durch eine strukturierte Auftrennung Teilaufgaben ableiten lassen.

So ergibt sich bei einem Datenaustausch folgende Signalstruktur:

 $\mathsf{Lesen} \to \mathsf{Verarbeiten} \to \mathsf{Schreiben}$

Grundsätzlich werden diese Teilaufgaben mit einer Auflistung der dazu benötigten Softwareapplikationen definiert. Das Lesen der Prozessdaten und Ausgangsdaten erfolgt über eine OPC-UA-Schnittstelle. Das Auslesen
des Servers wird mittels eines OPC-UA-Clients in C# realisiert. Die nachfolgende Verarbeitung der ausgelesenen Daten impliziert die Erstellung von formatgebundenen Input-Files, welche an MATLAB übergeben werden.

In MATLAB werden, entsprechend einer definierten Regelstrategie, notwendige Systemeingänge der Stellbzw. Führungsgrößen bestimmt und anschließend in einem formatgebundenen Output-File an den OPC-UA-Client übergeben. Die abschließende Schreibroutine leitet die Eingangsgrößen mittels des OPC-UA-Clients an den OPC-Server. Durch die zyklische Abfolge dieser Routinen wird ein geschlossener Regelkreis definiert. Die Einrichtung dieser Signalstruktur ist Gegenstand laufender Arbeiten am IWB. Sobald diese Arbeitsschritte erledigt sind, können erste Systemstarts zur Modellbildung und Identifikation des Systems- und Übertragungsverhaltens durchgeführt werden. Parallel dazu sollen Stellgrößenverläufe (etwa Phasenströme am Stator) bei einem drehzahlgeführten Mischprozess dahingehend analysiert werden, um aussagen zu können, inwieweit deren Verläufe auf die Güte des Mischguts im Laufe des Mischprozesses dezidierte Rückschlüsse erlauben. Die Drehzahl wird in diesem Fall vom Umrichter PI-geregelt.

6.1.2.2 Arbeitsthese für die Getriebe des 1,25m³ Technikumsmischerantriebs

Als Diskussionsgrundlage mit den entsprechenden Projektpartnern wurdw eine Arbeitsthese erstellt und auf dieser Grundlage ein Pflichtenheft abgeleitet. Die Konstruktion der Getriebe erfolgt auf der Basis der Arbeitsthese und dem Pflichtenheft "Schwerlastservogetriebe für den 1,25 m³ Doppelwellenmischer", die in Tabelle 6.28 dargestellt ist.

	Arbeitsthese	Pflichtenheft
Applikation	Doppelwellenchargenmischer für Laborun-	
	tersuchungen für das Forschungsvorhaben	
	Betonfahrbahn 4.0	
Typ des Mischers	Liebherr Doppelwellenmischer, Volumen	
	1,25 m³	
Nenndrehzahl der Mischer-	n ₂ = 20 min ⁻¹	
welle		
Motornennleistung	P = 45 kW für beide Mischerwellen	Wunsch IWB mindestens 2-fache Nennleis-
		tung
Motorposition	- Ein und Zwei Motoren,	- Zwei Motoren
	- Motorwelle(n) horizontal oder vertikal	 Motorwellen horizontal
	 Motor(en) auf separaten Konsolen 	 Motoren auf separaten Konsolen
Umgebungstemperatur	20 °C	
Luftfeuchtigkeit maximal	100 %	
Kontamination der Luft	- Saure Aerosole	
	- Staub der Grundsubstanzen des Be-	
	tons	
Momentmessung	an der Mischerwelle	Momentmessung an der Getriebeab-
		triebswelle und mittels eines Lastmessbol-
		zens an der Drehmomentstütze
Drehbewegungsmessung	an der Mischerwelle	
Antriebssteifigkeit qualita-	konzeptionell hoch	
tiv		
Verlagerung des Mischer-	- Axial 0 mm	- Verwendung von Gelenkwellen zur
wellenzapfens	- Raumwinkel 3,5°	Kopplung der Getriebe an den Antriebs-
		wellen
		- Getriebe reitend montiert

Tabelle 6.28:Arbeitsthese Schwerlastservogetriebe für den 1,25 m³ Doppelwellenmischer, Stand März 2018 und prä-
sentiert im Rahmen des 3. AG Treffens

6.1.2.3 Auszug aus dem Lastenheft der zu erfassenden Mischparameter

	1		1
Messgröße	Messort	Messmethode	Einheit des Wertes
Drehmoment zur Schließung auf den Vermischungszustand des Be- tons über die Mischkraft	Doppelwellenmischer Antrieb, Getriebeabtriebswelle	Magnetoresistiver Sensor (TAM)	Nm (aus Spannung in V)
Drehmoment zur Schließung auf den Vermischungszustand des Be- tons über die Mischkraft	Doppelwellenmischer Antrieb, Koppelgelenk Drehmomentstütze (an einem der zwei Getriebe)	Lastmessbolzen (Magtrol)	Nm (aus Spannung in V)
Drehzahl	Motor	motorinterner Drehgeber	min-1 (aus Striche pro Zeiteinheit)
Drehzahl (optionale Erweiterung bei Bedarf)	Getriebeabtriebswelle, mischer- abgewandte Seite	zusätzlich verbauter Drehge- ber	min-1 (aus Striche pro Zeiteinheit)
Leistungsaufnahme des Motors	Umrichter	elektronisch	kW (Berechnet aus der Spannung in V und Strom in A)
Temperaturen: 1 x Umgebungstemperatur 3 x Getriebegehäusetemperatur	 In der Umgebung im Bereich des Mischerantriebssatzes Außen am Gehäuse im Be- reich des axial belasteten Schneckenwellenlagerau- ßenrings Außen am Gehäuse im Be- reich des Ölsumpf Außen am Gehäuse, Schne- ckenradrohr unten 	Thermoelement Typ K	°C (Konvertierung aus einer gemesse- nen Spannung in V)
Verdrehspiel der Kopplungsele- mente	Zwischen Schneckenwellenen- den, jeweils an der Gelenkwelle	manuelle Längenmessung	Grad (aus den gemessenen Längen in mm)
Verdrehspiel der Verzahnung	An An- und Abtriebswelle	manuelle Längenmessung	Grad (aus den gemessenen Längen in mm)
Dichtigkeit	An- und Antriebswelle (RWDR), Deckel, Verschlussschrauben der Getriebe	Einschätzung des Personals	-
Laufgeräusch	Geräuschemission des Antriebs	Einschätzung des Personals	-

Tabelle 6.29: Auszug Lastenheft der zu erfassenden Mischparameter

6.1.2.4 Getriebeaufbau

Die Getriebe werden entsprechend der Arbeitsthese beziehungsweise dem Pflichtenheft konzeptioniert und konstruiert. Die Getriebe sind Schneckengetriebe der Bauform CDW 200 und werden in der Ausführung SO-A beziehungsweise SO-B eingebaut. In Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 wird das Getriebe in der Ausführung SO-A dargestellt.

Das Getriebe wird an den Flansch der Mischerwelle des Technikumsmischers montiert, an den das serienmäßige Getriebe der Firma Liebherr ebenfalls montiert ist. Das Gegenstück ist in Abbildung 6-29, linke Ansicht, dargestellt.

Um eine geringe Durchbiegung der Schneckenwelle, im Betrieb, zu erreichen ist die Schneckenwelle im Schneckenwellenrohr mit einer Fest-Los-Lagerung mit kleinem Lagerabstand gelagert. Das Festlager ist ein Kegelrollenlagerpaket. Das Loslager bildet ein Zylinderrollenlager. Die Kupplung zwischen Schneckenwelle und Antriebsmotor (Abbildung 6-34 links, linkes Wellenende) muss im weiteren Projektverlauf noch definiert werden. Die Getriebe werden an den jeweils zweiten Schneckenwellenenden (Abbildung 6-34 rechts, rechtes Wellenende) über eine homokinetische Gelenkwelle synchronisiert werden.

Die Lagerung der Abtriebswelle ist eine verstärkte Lagerung durch die Verwendung von Kegelrollenlagern, statt wie üblich Rillenkugellagern. Die Drehmomentstütze mit der das Reaktionsmoment des Getriebes abgestützt wird ist direkt an das Schneckenradrohr des Gehäuses angeschweißt. Die Wandstärke des Gehäuses ist im Verhältnis zu vergleichbaren Seriengetrieben größer gewählt. Die erhöhte Wandstärke verleiht dem Getriebegehäuse die für den Schwerlastservobetrieb nötige Verwindungssteifigkeit.



Abbildung 6-34: Schwerlastservogetriebe Außenansicht

Der Schneckenradsatz als kompletter Satz oder auch die Verzahnungsteile können für den Fall, dass diese beschädigt werden bei, an den Mischer, montierten Getriebe ausgetauscht werden. Damit kann die schnelle Reparatur des Getriebes realisiert werden, so dass es bei den Versuchen am IWB nur zu geringen Zeitverzögerungen kommen würde.



Abbildung 6-35: Schwerlastservogetriebe Axialschnitt Schneckenwelle (links) und Axialschnitt Abtriebswelle (rechts)

Die Abtriebswelle besteht aus 45CrNiMo16, ein für den TAM-Sensor als sehr gut eingestuft geeigneter Werkstoff. Der TAM-Sensor wird mittels einer Halterung, die an den Abtriebsdeckel des Getriebes geschraubt werden kann, positioniert, wie in Abbildung 6-35 zu sehen.



Abbildung 6-36: Halterung TAM-Sensor

Anbindung des Antriebsmotors



Abbildung 6-37: Tecknikumsmischer, Blick auf die Antriebsseite mit Motor

Der Motor wird an das direkt angetriebene Getriebe mittels einer sogenannten Motorlaterne oder Motorglocke (siehe Abbildung 6-37) an das Getriebe angeschraubt. Die Gewichtskraft des Motors wird dabei über den Motorflansch und den Zentrierbund an der Motorlaterne abgestützt. Die Laterne stützt sich ebenfalls zentriert am Gehäuse ab. Zwei Zylinderstifte dienen zur Abstützung des Reaktionsmoments des Motors. Die Masse des Getriebes und des Motors hängt somit an der entsprechenden Mischerwelle und Mischerwellenlagerung.



Abbildung 6-38: Montage Schwerlastservogetriebe mit Laterne

Als Kupplung zwischen Motorwelle und Getriebeantriebswelle wird eine Klauenkupplung für Servoanwendungen verwendet. Bezeichnung der Kupplung: ROTEX GS 65 D55/75.



Abbildung 6-39: Klauenkupplung

Kopplung der Getriebe

Die Antriebswellen der Getriebe werden mit der in Abbildung 6-40 dargestellten Gleichlaufgelenkwelle verbunden. Das rechte Getriebe, bei Blick auf den Antrieb, treibt damit das zweite Getriebe an. Die Gelenkwelle dient zudem der Synchronisation der Getriebe und damit auch der Mischerwellen. Die Anbindung erfolgt am jeweils zweiten Schneckenwellenende mit einer Nabe und entsprechendem Flanschbild. Die Gelenkwelle lässt eine relative Verlagerung der Getriebe zueinander zu. Die maximale Betriebsdrehzahl für die Gelenkwelle beträgt 2000 min⁻¹.

Produktbezeichnung für die Gelenkwelle der Firma Elbe: 0.908.109.010.800 (ELBE Artikelnr.: SA 028)

Produktbezeichnung der Nabenflansche: 1.110.240 (ELBE Artikelnr.: 55130)

Produktbezeichnung für die Verschraubung: Satz-Kardanschrauben 6/8 (ELBE Artikelnr.: 13799)



Abbildung 6-40: Koppelelemente für die Getriebesychronisation und den Antrieb des zweiten Getriebes

Abmaße des optimierten Antriebsstrangs

Die Abmaße des Antriebsstrangs sind in Abbildung 6-41 zu sehen. Der grundsätzliche Aufbau des optimierten Antriebsstrangs ändert sich im Vergleich zum Original-Antriebsstrang hauptsächlich in der Anbindung des Motors. Der Motor wird über die Motorlaterne direkt in Verlängerung der Getriebeantriebswelle angebaut. Das führt zu einem erhöhten Platzbedarf in der Breite, mit 3.505 mm, des Mischers. Der Abstand von 689 mm zur Schnittstelle zwischen Getriebe und Mischerwelle wird ebenfalls vom Motor geprägt. Direkt in Verlängerung des Mischertrogs baut der Antrieb etwas schmäler, als der Original-Antrieb.



Abbildung 6-41: Einbaumaße Technikumsmischer inklusive direkt antreibendem Motor

6.1.2.5 Antriebsoptimierungen am Liebherr Labormischer DW0.06/100

Parallel zu den Entwicklungen des Antriebsstrangs der Technikumsanlage wurde im Rahmen der Entwicklung des Labormischers DW0.06/100 ebenfalls der Antriebsstrang optimiert. Hierbei ist unter Berücksichtigung der Ziele bei der Konzeption des Labormischers nach ähnlichen Kriterien vorgegangen worden. D.h. es wurden gezielt Kopplungseffekte sowie Antriebselastizitäten minimiert.

Dazu wurde die Topologie des Antriebsstrangs anhand einer im Feld üblichen Mischanlage optimiert. Wird die Kraftwandlungskette des herkömmlichen Antriebstrangs betrachtet, wird die Asynchronmaschine mit Nennfrequenz direkt mit Netzfrequenz betrieben. Darauf folgt ein Riementrieb, welcher mit einer 1:1 Übersetzung den Asynchronmotor an die Synchronisationswelle der Getriebe ankoppelt. Diese Synchronisationswelle leitet darauf die Kraft antriebsseitig in die zwei mehrstufigen Planetengetriebe ein, welches die Nenndrehzahl des Asynchronmotors auf die Nenndrehzahl der Mischwellen wandelt. Schematisch ist die Kraftwandlungskette in der Abbildung 6-42 dargestellt.



Abbildung 6-42: Schematische Darstellung der Topologie des Antriebsstrangs einer herkömmlichen Mischanlage

Hierbei sind die Kopplungseffekte mit fehlender Information über die Aufteilung des Kraftaustauschs über die Synchronisationswelle sowie das Übertragungsverhaltens des Keilriementriebs für weitere Analyseschritte zur rheologischen Beurteilung des Betons von Nachteil. Daher wurde bei dem Labormischer auf zwei getrennte Antriebsstränge gesetzt. Hierbei wurde je Mischerwelle ein separater Asynchronmotor mit einer einstufigen Kegelradübersetzung zur Mischerwelle gewählt. Weiter sind beide Antriebsstränge motorseitig mittels eines Zahnriemens zwangssynchronisiert, damit der Gleichlauf der Mischerwellen zu jedem Zeitpunkt sichergestellt ist. Damit variabel die Versuchsszenarien eingestellt werden können wird der Antriebsstrang über einen Frequenzumrichter erweitert. Eine schematische Darstellung dieser optimierten Antriebstopologie kann Abbildung 6-43 entnommen werden. Durch diese Antriebstopologie fließt über die Synchronisation im Idealfall keine oder nur wenig Kraft über den Zahnriemen.



Abbildung 6-43: Schematische Darstellung der optimierten Topologie des Antriebsstrangs des Liebherr Labormischers DW0.06/100

Weiter wird anhand dieser Struktur die Sensorik im Antriebsstrang zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften des Mischguts ausgewählt. Dazu kommen zur Erfassung der Position/Drehzahl (mechanische Potentialgröße) zwei hochauflösende Inkrementalgeber auf der Antriebsseite zum Einsatz. Da Getriebe allgemein als schlupffrei angenommen werden können ist damit die mechanische Potentialgröße in beiden Antriebssträngen eindeutig bestimmt und es können darüber hinaus aufgrund der Redundanz ggf. etwaige Synchronisationseffekte aufgelöst werden. Die Flussgröße Moment (verallgemeinerte Kraft) wird über verschiedene Ansätze untersucht. Zum einen wird auf dem Frequenzumrichter eine Momentenbeobachtung auf Basis eines Feldflussschätzers durchgeführt. Zum anderen wird das Reaktionsmoment zwischen dem Getriebe und dem Mischertrog über eine Pendelstütze erfasst. Beide Signale enthalten Artefakte der Charakteristik des Mischerantriebs wie Reibung, Rückkopplungen der Mischeroberfrequenz, Vorspannungen (Synchronisationsriemen), etc. und müssen im weiteren Verlauf weiter analysiert und aufbereitet werden. Mittels des Labormischers bestand somit im weiteren Verlauf des Projektes die Möglichkeit, die Analyse des Energieeintrages in den Mischprozess respektive die (Verlust-) Leistungsbetrachtung systematisch zu berechnen bzw. zu messen. Hierzu wird auf Basis eines dynamischen Beobachters das Antriebsmoment rekonstruiert und mittels Lastmessungen für den Antriebsstrang validiert.

6.1.3 B1.3 - Labormaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen

Grundlage für eine systematische Analyse und darauf aufbauend gezielte Steuerung der Eigenschaften von Fahrbahnbetonen ist die Umsetzung eines rheologiegestützten Mischprozesses im Labormaßstab. Ziel ist die Mischungsoptimierung zur reproduzierbaren Herstellung von Betonen für die untere und obere Betonlage von Fahrbahnen.

6.1.3.1 Laboruntersuchungen am IWB

Betonherstellung im Labor-Einwellen-Zwangsmischer

Ziel ist die Mischungsoptimierung zur reproduzierbaren Herstellung von Betonen für die untere und obere Betonlage von Fahrbahnen. Die Optimierung der Mischprozessführung sollte ursprünglich mittels des Einsatzes eines über einen Frequenzumrichter geregelten Konusmischer der Firma Kniele dem KKM-RT 15/22.5 vorgenommen werden. An diesem Mischsystem sollte auch die Erprobung und Auswahl von Mischer-integrierten Feuchtemesssystemen vorgenommen werden.

Wie bereits in den Ausführungen zur Frischbetonherstellung auf Seite 28 und folgenden aufgezeigt, musse festgestellt werden, dass der am IWB im Bau befindliche Prototyp des gemeinsam vom IWB und Fa. Kniele entwickelte und in seiner Systemcharakteristik patentierte Mischsystem KKM-RT 15/22,5 nicht in den ersten beiden Jahren der Projektlaufzeit des Vorhabens Betonfahrbahn 4.0 fertiggestellt und in Betrieb genommen werden konnte.

Entsprechend wurde der am IWB verfügbare Konusmischer KKM-30 zum Einsatz gebracht, der zwar betriebsbereit war, aber der bei ersten Versuchsmischungen offenbarte, dass in Anbetracht des engen Auslasses am unteren Konus die steifen Frischbetongemische insbesondere des Unterbetons nicht aus dem Mischer vollständig haben entleert werden können, sondern nur mit einem Stochern entleert werden konnten.

Folglich wurde der am IWB verfügbare Einwellenmischer, der Laborzwangsmischer CEM 60 S Evon ELBA zum Einsatz gebracht, der mit einem Frequenzumrichter in Verbindung mit einem gegenüber der Strandartauslegung deutlich leistungsfähiger betrieben werden kann als Standardmischsysteme.

In [Balzer 2018] wurde der Einfluss der Mischintensität und der Mischdauer auf den sich ausbildenden Luftporengehalt analysiert.

Für die in Tabelle 6.7 aufgezeigte Mischungsrezeptur führte er mit den bereits auf den Seiten 204 und 205 aufgezeigten Leistungsdaten des Einwellenmischers Versuche mit unterschiedlichen Mischzeiten für einen Oberbeton mit einem w/z-Wert von 042 durch, um den Einfluss der Mischdauer wie auch den Einfluss sich ändernder w/z-Werte auf den Luftporengehalt zu analysieren.

Die in den Versuchen zum Einsatz kommende Zusammensetzung kann Abbildung 6.43 entnommen werden.

Material		Anteil für 1 m ³ Frischbeton	Anteil für 30 l Frischbeton	
CEM 42,5 N		420 kg	12,6 kg	
Feine Gesteinskörnung 0/2		650 kg	19,5 kg	
Gebrochene, grobe Gesteinskörnung 5/8		1248 kg	37,4 kg	
Fließmittel		1260 g	37,8 g	
	PANTAPOR 66K	103 g	3,09 g	
Lunporenblidher	PANTAPOR 2020	206 g	6,18 g	

Abbildung 6-44: Zusammensetzung der in der Bachelorarbeit von Balzer analysierten Frischbetonrezeptur für ei nen Waschbeton

Analyse der Luftporenausbildung

Das Versuchsprogramm umfasste die folgenden Parameter:

•	Veränderung w/z-Wert:	0,38 / 0,40 / 0,42 / 0,44
•	Veränderung Mischzeit:	½ min / 1 min / 2 min / 4 min / (10 min)
•	Veränderung Art & Gehalt des LP:	synthetischer / natürliche LP
		variable Mengen an LP

Als Luftporenbildner kam ein synthetischer Luftporenbildner, das LP Konzentrat PANTAPOR 66K (LP) zum Einsatz. Laut Hersteller erreicht man mit 0,25 ml je kg Zement etwa 4,0 – 4,5 Vol.-% Luftporen im Beton. Bereits der Hersteller weist darauf hin, dass der Luftporengehalt von verschiedenen Faktoren wie Betonzusammensetzung und Mischzeit abhängig ist.

Als natürlicher Luftporenbildner wurde der wurzelharzbasierte Luftporenbildner PANTAPOR 2020 (LP) zum Einsatz gebracht. Hier empfiehlt der Hersteller eine Dosierung von 0,5 ml/kg Zement, um einen Luftporengehalt von 4,0 bis 4,5 Vol.-% zu erreichen.

Der Zusatzmittelanteil ist sehr gering, weshalb die Dosierung über die Zugabe zum Wasser erfolgt und das Gemisch dann dem Mischvorgang zugeführt wird.

In den Untersuchungen wurde der LP-Topf, der Super Air Meter (SAM)wie auch der Air Void Analyzer (AVA) zum Einsatz gebracht. In späteren Untersuchungen wurden im Kontext der Mischversuche in der Technikumsmischanlage noch das Verfahren und Gerät zur Untersuchung von Frischbeton mit künstlich eingeführten Luftporenweitere nach Bottke zum Einsatz gebracht, weshalb dieses der Vollständigkeit wegen hier an dieser Stelle angeführt werden soll.

<u>LP-Topf</u>

Als Luftporentopf wurde ein Prüfsystem der Fa. Testing Bluhm & Feuerherdt GmbH mit einem Fassungsvolumen von 8 Litern eingesetzt, das dem Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 folgt. Beim Öffnen der Ventile zum Druckausgleich muss der Differenzdruck zu dem mit Beton gefüllten LP-Topf 0,4 bis 0,5 bar betragen.

Super LP-Topf nach Bottke

Auch der Super LP-Topf nach Bottke dient der Bestimmung des LP-Gehalts mittels Druckausgleichs-verfahrens (vgl. Abbildung 6.45). Er ist eine Weiterentwicklung und wird über die Fa. Form & Test GmbH vertrieben.



Abbildung 6-45: Super LP-Topf nach Bottke

Der Topf wird schichtweise mit Frischbeton gefüllt und parallel dazu auf der Rüttelplatte verdichtet. Nach der Reinigung des Randes des Topfes wird ein Deckel aus Plexiglas aufgelegt und der Deckel durch das Anziehen von Schrauben befestigt.

Zum Messen des Luftporengehalts wird in der Druck-kammer ein Solldruck von 2,0 bar erzeugt. Das Volumen des LP-Topfes beträgt 6 Liter. Wird der Druckausgleich durch ein Ventil im Deckel geschaffen, lässt sich auf einem Manometer der sich einstellende Druck ablesen und der daraus ableitbare Luftporengehalt kann ermittelt werden.

<u>Super Air Meter (SAM)</u>

Der Super Air Meter ist ein Luftporentopf, der neben der Messung des Gesamtluftgehalts, auch eine Aussage über den Abstandsfaktor der Luftporen im Frischbeton geben soll (vgl. Abbildung 6.45). Die Verwendung des SAM auf der Straßenbaustelle ist von Vorteil, um schon am Frischbeton den Frost-Taumittel Widerstand vor dem Einbau zu überprüfen.



Abbildung 6-46: Super Air Meter (SAM)

Der SAM wird wie der LP-Topf schichtweise mit dem Frischbeton befüllt und gleichzeitig auf dem Rütteltisch verdichtet. Der Deckel wird auf eine saubere Oberfläche aufgesetzt und mit den Befestigungsklammern fixiert.

Anschließend wird der Topf mit Wasser durch die Ventile des Deckels befüllt. Die Luftblasen müssen durch gründliches Spülen mit Wasser und vorsichtiges Schwenken aus dem Topf geleitet werden, bevor die Ventile geschlossen werden.

Der Test mit dem SAM ist eine modifizierte Methode der Standard-Druckmessung für Luftgehaltuntersuchung von Frischbeton basierend auf der amerikanischen ASTM C231 Methodik, deren Bestimmungsgrundlage das Verhältnis zwischen Druck und Volumen ist. Die Testmethode ist geeignet für eine dichte Anhäufung an Luftporen. Der Frischbetonluftgehalt kann jedoch vom tatsächlichen Luftgehalt im Festbeton abweichen. Dabei kommt es hauptsächlich auf die Testmethode, die Gleichmäßigkeit und Stabilität der Luftporen an.

Zu Beginn des Tests wird auf dem Manometer das Programm des SAM Tests ausgewählt. Im Anschluss wird überprüft, ob der gesamte Druck aus der Druckkammer entwichen ist und das Manometer einen Druck von +/- 0,03 Psi zeigt. Psi ist die Bezeichnung der Einheit für Druck im angloamerikanischen Maßsystem, wobei 14,5 Psi ungefähr einem Bar entsprechen. Die 14,5 Psi entsprechen der Druckdifferenz zu dem im Topf durch die Atmosphäre bereits vorhandenen Drucks von einem Bar. Im Gegensatz zum LP- Topf arbeitet der SAM mit verschiedenen großen Drücken. Zuerst wird mit der Handpumpe ein Druck von 14,5 +/- 0,05 Psi (Abbildung 6.47, 1.) in der Druckkammer erzeugt. Der Druck kann über ein Ventil reguliert werden. Ist der Druck stabil, prüft das Manometer, ob der Druck im gewünschten Bereich ist und zeigt an, ob der Test beginnen kann. Danach wird der Druckausgleichshebel betätigt und gehalten. Mit einem Hammer wird drei Mal auf den Topf geschlagen, um eine Erschütterung zu verursachen, die letzte Anhaftungen im Topf löst, sodass der Druckausgleich so weit wie möglich fortschreiten kann. Dann wird der Hebel wird weitere 10 Sekunden gehalten, um den Druckausgleich zwischen Topf und Druckkammer zu ermöglichen. Wenn der Druck nicht stabil ist, wird der Test automatisch abgebrochen. Der Grund dafür ist meistens, dass der Hebel nicht lange genug gehalten wurde oder dass ein Leck existiert. Nachdem der Schritt erfolgreich durchgeführt wurde, zeigt der SAM den Luftgehalt an.



Abbildung 6-47: Schematische Darstellung des Ablaufs der Versuchsdurchführung mit dem Super Air Meter

Die weitere Vorgehensweise dient zur Bestimmung der SAM Nummer. Ohne, dass die Ventile geöffnet werden, wird nun in der Druckkammer ein Druck von 30 +/- 0,05 Psi (2,07 Bar) (Abb.6.47, ((2.)) aufgebaut. Bei stabilem Druck wird der gleiche Vorgang wie zuvor bei 14,5 Psi wiederholt. Nun wird in der Druckkammer durch erneutes Pumpen ein Druck von 45 +/- 0,05 Psi (3,10 Bar) (Abb. 6.47, (3.)) erzeugt und ebenfalls alle weiteren Schritte wie zuvor ausgeführt. Wie Abbildung 15 zeigt wird in der Druckkammer (Top Chamber) ein Druck aufgebaut, der dann in den Topf (Bottom Chamber) eingelassen wird und zu einem Druckausgleich zwischen Topf und Druckkammer nach DIN EN 12350-7 sorgt. Die Linienverläufe schneiden sich im Moment des Druckausgleichs, da sich das erzeugte Druckniveau in der Druckkammer verringert und sich der Druck im Topf schlagartig auf dasselbe Niveau erhöht. Die grüne Linie zeigt den steigenden Verlauf des Ausgleichsdrucks (Equilibrium Pressure) im Topf, bei dem der Druck mit der Druckkammer im Gleichgewicht ist.

Anschließend werden die Ventile vorsichtig geöffnet und der Druck langsam aus dem Topfund der Druckkammer entlassen. Der gleiche Beton wird in dem Topf behalten, der Deckel wird nicht entfernt und es wird Wasser über die Ventile in den Topf gefüllt, bis kein Hohlraum unter dem Deckel mehr vorhanden ist.

Im Folgenden werden alle Schritte mit 14,5, 30 bis 45 Psi wiederholt. Wenn alles erfolgreich vollendet wurde, wird die SAM Nummer angezeigt.

SAM Number (Super Air Meter Nummer)

Die SAM Nummer entspricht der gemessenen Druckdifferenz der Ausgleichsdrücke, die sich nach dem Druckausgleich im Topf einstellen, zwischen dem ersten Messdurchgang mit einem Druck von 45 Psi und dem zweiten Messdurchgang mit einem Druck von 45 Psi (Abbildung 6.48).



Abbildung 6-48: Schematische Darstellung des Ablaufs der Versuchsdurchführung mit dem Super Air Meter

Bei korrekter Durchführung des Versuchs ist nach dem 2. Druckausgleich bei 45 Psi im Topf ein geringfügig größerer Ausgleichsdruck als nach dem 1. Druckausgleich bei 45 Psi. Im 1. Testdurchlauf wird der Frischbeton schon unter Druck komprimiert und einige größere Luftblasen können entweichen. Im 2. Testdurchlauf kann der Frischbeton dann weniger komprimiert werden und es stellt sich ein höherer Ausgleichsdruck ein.

Laut einer Versuchsreihe des Herstellers mit über 300 Betonmischungen korreliert eine SAM Nummer von 0,20 Psi und niedriger am besten mit einem Abstandsfaktor (Spacing Factor) der Luftporen von 0,2 mm (0,008

inches) (Abbildung 6.49). Dabei wurde bei der Frischbetonprüfung die SAM Nummer ermittelt und nach 7-14 Tagen das Luftporengefüge des Festbetons analysiert. Die Festbetonprüfung erfolgte mit der ASTM C457 Methode, die ein Standardverfahren zur mikroskopischen Messung der Paramater im Luftporengefüge ist. Eine größere SAM Nummer als 0,2 Psi zeigt, dass der Abstand der Luftporen deutlicher wird und der Abstandsfaktor nicht mehr im gewünschten Bereich von 0,2 mm liegt. Ergebnisse mit negativen und zu hohen SAM Nummern wurden gestrichen, weil die Ergebnisse durch undichte Stellen oder falscher Durchführung des Testversuchs aufgetreten sind. Eine negative SAM Nummer entsteht dann, wenn der Ausgleichsdruck im 2. Durchlauf unter dem des ersten Durchlaufes liegt. In 81% der Versuche wurde mit einer SAM Nummer von höchstens 0,2 Psi ein Abstandsfaktor von höchstens 0,2 mm erzielt. Wurde das Limit der SAM Nummer auf 0,25 Psi erweitert, fielen sogar 89% der Versuche in den gewünschten Bereich.



Abbildung 6-49: Zusammenhang zwischen der SAM Nummer und dem Abstandsfaktor

Air Void Analyzer

Mittels Air Void Analyzer (AVA) werden die Parameter Abstandsfaktor und spezifische Oberfläche der künstlich eingebrachten Luftporen im Frischbeton gemessen. Der AVA wurde Anfang der 1990er Jahre von Dansk Beton Teknik entwickelt und soll die Qualität der kritischen Luftporenpara-meter während des Einbaus der Fahrbahnbetone schneller und besser erfassen (Messprinzip siehe Abbildung 6.50).

Zur Durchführung der Prüfung mit dem AVA muss zunächst mit der mit dem Gerät ausgelieferten Spritze eine Probe aus dem verdichteten Frischbeton entnommen werden. Die Probemenge sollte mindestens 20 cm³ Frischbeton umfassen und kein grobes Gesteinskorn enthalten. Die Probengewinnung erfolgt mit einer in einem Drahtkäfig eingeführten Spritze (vgl. Abbildung 6.51). Der Drahtkäfig wird über eine Schlagbohrmaschine mittels Vibrationen in den Beton eingeführt. Gleichermaßen anspruchsvoll sind auch die weiteren notwendigen Schritte zur Probengewinnung. Zunächst muss das Wasser des AVA-Gerätes temperiert werden. Zudem muss eine viskose Flüssigkeit mithilfe eines dafür vorgesehenen Messbehälters in den mit Wasser gefüllten Zylinder gegeben werden. Dann wird der Auftriebsrekorder eingehängt. Die viskose Flüssigkeit weist eine höher Dichte als Wasser auf und verbleibt daher im unteren Bereich des Zylinders. Die viskose Flüssigkeit ist notwendig, um den Aufstieg der bei der Messung freiwerdenden Luftblasen zu verlangsamen und einen Teil der Blasen zu verhindern. Die Probe wird seitlich am unteren Ende des Zylinders eingeführt und nach dem Beginn des Messvorgangs mit einem Magnetrührer für 30 Sekunden verrührt (vgl. Abbildung 6.50 "inverted dish").



Abbildung 6-50: Air Void Analyzer (AVA) - Funktionsweise

Die aufsteigenden Luftblasen sammeln sich unter dem Auftriebsrekorder und werden mithilfe einer Waage zu bestimmten Zeitpunkten gemessen (siehe rechtes Diagramm in linker Darstellung Abbildung 56).



Abbildung 6-51: Käfig mit Spritze (links); Air Void Analyzer beim Befüllen mit Spritze (mitte); aufsteigende Luftblasen während dem Versuch (rechts)

Die dabei aufgenommene Veränderung des Auftriebs wird als Gewichtsänderung des Gewichts gemessen und als Zeitfunktion dargestellt. Dadurch kann dann auf die Anzahl, Größe und die Mengenverteilung der Luftporen kleiner 300 µm geschlossen werden. Zudem lässt sich der Abstandsfaktor und die spezifische Oberfläche des Betons bestimmen.

Verfahren und Gerät zur Untersuchung von Frischbeton mit künstlich eingeführten Luftporen

Gegen Ende des Verbundvorhabens konnte nach der Offenlegung der Patentschrift im Zuge der Frischbetonherstellung zur Erprobung der rheologiegestützten Mischprozessführung wie auch bei der Herstellung der Frischbeton für den Einbau mit der Offset-Schalung im Experimentalprüfstand erprobt werden. Das von Bottke und Baumert entwickelte Verfahren nutzt die in der Young-Laplace Gleichung definierte Tatsache, dass die Oberflächenspannung der die Poren bildende Blase von der Größe der Pore abhängt und erlaubt den Porengehalt und den Anteil kleinen Poren zu bestimmen. Je kleiner die Pore ist, umso mehr Druck ist erforderlich, die Blasenwand zu verformen. In einem Druckbehälter befindet sich der Beton. Der Druck auf das die Probe umgebende Wasser wird mit einer Dosierpumpe stetig erhöht. Mit Boyle-Mariotte wird eine Standardkurve errechnet, die mit der erfassten Druckerhöhung abgeglichen wird. Anhand des so erfassten Kurvenverlaufs kann der Anteil kleiner und großer Poren abgelesen werden. Das Verfahren nutzt den in DE 20 2016 000 540 U1 aufgezeigten Behälterdeckel und einen Druckbehälter nach ASTM C-231 Typ A in Edelstahlausführung. In den durchgeführten Messreihen konnte aufgezeigt werden, dass anhand der Messergebnisse einerseits Aussagen zum Mikroluftporengehalt gegeben werden können.

So hängt der innere Druck und damit die Stabilität der Poren vom Durchmesser ab. Je kleiner der Durchmesser je höher der innere Druck. Dies ergibt sich aus der Young Laplace $\Delta P = (4^*\lambda)/r$. Ent-sprechend ist der innere Druck einer Pore mit einem Durchmesser von 50 µm um den Faktor 20 höher als der einer Pore mit einem Durchmesser von 1000 µm d.h. 1 mm. Der hohe innere Druck in kleinen Poren erklärt die Tatsache, dass der normale LP Topf (Druckausgleich mit Prüfdruck von 0,4...0,5bar) nicht alle Poren erfasst. Dies trifft besonders die kleinen Poren, weshalb LP Töpfe auf Basis des Druckausgleichs zur Bewertung der Mikroporenanteile nicht ausreichen.

6.1.3.2 Betontechnologische und mischprozessbedingte Einflüsse auf den Luftporengehalt

In [Mohr 2018] und [Balzer 2018] wurden die mit dem Super Air Meter gemessenen Luftporengehalte dem mit dem herkömmlichen Luftporentopf gemessenen Luftporengehalten einander gegenübergestellt, um die Praxistauglichkeit des SAM zu überprüfen. Außerdem sollte überprüft werden, inwieweit die Art und der Gehalt der Luftporenbildner, die Mischzeit und der Wasserzementwert Einfluss auf die Ausbildung der Luftporen im frischbeton nehmen. Die Betonmischungen werden unter konstanten Bedingungen hergestellt. Je Mischversuch wurden 30 Liter Frischbeton hergestellt und anschließend direkt mit dem LP- Topf und dem Super Air Meter der vorhandene Luftporengehalt gemessen. Gleichzeitig wurde eine Probe mit der Spritze für den Air Void Analyzer gezogen, dessen Messergebnisse im Anschluss erläutert werden.

Luftporengehaltsmessung in Abhängigkeit des w/z-Wertes

Da die Referenzmischung einen w/z- Wert von 0,42 aufweist, sollte der Einfluss eines abweichenden w/z-Werts auf den Luftporengehalt überprüft werden. Daher wurde neben dem w/z-Wert von 0,42 auch Frischbetone mit den Wasserzementwerten von 0,38; 0,40 und 0,44 hergestellt und untersucht.

Die Versuchsergebnisse V1-1 bis V1-4 zeigen, für die mit einer Mischzeit von einer Minute hergestellten Frischbetone, dass ein Wasserzementwert von 0,38 zu einem zu niedrigen Luftporengehalt führt. Grund ist die steife Konsistenz und die schlechte Verarbeitbarkeit des Betons durch den geringen Wasseranteil. Demgegenüber führt die Versuchsreihe mit einem Wasserzementwert von 0,44 mit dem wurzelharzbasierten Luftporenbildner "PANTAPOR 2020" zu sehr hohen Werten.

Tabelle 6.30:	Gegenüberstellung der mittels LP-Topf und SAM gemessenen Luftporengehalte für die beiden
	LP-Bildner PANTAPOR 66K und PANTAPOR 2020

	Luftporengehalt [Vol%] bei Mischzeit 2 min					
Versuch	w/z- Wert	LP-	Topf	Super Air Meter		
	[-]	Luftporenbildner				
		66K	2020	66K	2020	
Vl-1	0,38	5,90	-	7,20	-	
VI-2	0,40	7,40	10,00	8,20	11,80	
VI-3	0,42	8,50	12,20	10,30	14,60	
Vl-4	0,44	9,70	-	11,90	-	

Die Versuchsreihe V2 wurde eine Mischzeit von einer Minute Mischzeit und die einfache Menge des LP-Bildners entsprechend der Vorgaben des Herstellers zum Erzielen von 4,0 – 4,5 Vol.-% Luftporen zugeführt. Der Volumenanteil der Luftporen wurde mit dem LP-Topf und dem Super LP-Topf nach Bottke bestimmt. In Abbildung 6.52 ist die Abhängigkeit des Luftporengehalts für den Einsatz des Super LP-Topfes nach Bottke aufgezeigt.



Abbildung 6-52: Luftporengehalt in Abhängigkeit vom w/z-Wert Super LP-Topf nach Bottke

Die mit dem LP-Topf, dem Super LP-Topf nach Bottke, wie auch mit dem AVA bestimmten Luftporengehalte sind in Abbildung 6.53in Abhängigkeit von w/z-Wert und Art des Luftporenbildners dargestellt.

Versuchsreihe V2	w/z-Wert	Volumen Luftporen in %					
		LP Topf		Super LP-Topf nach Bottke		AVA	
Luftporenbildner		66K	2020	66K	2020	66K	2020
V 2.1	0,38	_ (1)	6,20	_ (1)	5,90	_ (1)	3,20
V 2.2	0,40	5,45 ⁽²⁾	7,40	5,60	6,50	4,25 ⁽²⁾	4,20
V 2.3	0,42	5,20 ⁽²⁾	8,25 ⁽²⁾	5,50	7,17 ⁽²⁾	5,55 ⁽²⁾	4,27 ⁽²⁾
V 2.4	0,44	6,60	9,10	5,50	8,30	6,60	5,90

(⁽¹⁾ - keine Messung durchgeführt; ⁽²⁾ - gemittelter Messwert)

Abbildung 6-53: Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf, dem Super LP-Topf nach Bottke und dem AVA in Abhängigkeit des w/z-Wertes bei einer Mischdauer von einer Minute.

Da mithilfe des LP Topfes und Super LP-Topfes nach Bottke nur der gesamte Luftporenanteil in der zu untersuchenden Frischbetonprobe bestimmt werden kann, und daraus keine Informationen über den Abstandsfaktor oder die zu erzielenden Mikroluftporen mit Durchmesser kleiner als 300 µm zu erhalten sind, wurden weitere Untersuchungen durch den Air Void Analyzer (AVA) durchgeführt. Hierzu wurde jeweils für jede Versuchsreihe nach dem Verdichten des Frischbetons im LP Topf mithilfe der für den AVA vorgesehenen Spritze eine Probe entnommen. Anhand der Probe können Auswirkungen variabler w/z-Werte auf die Mikroluftporen und den Abstandsfaktor im AVA bestimmt werden.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.54 und 6.55, unterschieden nach dem jeweiligen Luftporenbildner, dargestellt.





Abbildung 6-54: Ergebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung für den LP-Bildner PANTHAPOR 2020



Luftporenverteilung AVA - 2020



In Abbildung 6.54 ist der gesamte Volumenanteil der Luftporen (dunkelblau) in der Betonprobe dargestellt. Hellblau markiert hingegen sind die darin befindlichen relevanten und gewünschten Luftporen mit einem Durchmesser kleiner als 300 µm. Hierbei ist zu erkennen, dass der Einsatz des synthetischen Luftporenbildners "PANTAPOR 66K" mit einem höheren w/z-Wert einen ebenfalls höheren Gesamtluftporenanteil bewirkt. Jedoch bleibt der Anteil der Mikroluftporen kleiner als 300 µm nahezu gleich bei etwa 2 Vol.%. Gleichzeitig erhöht sich der Abstandsfaktor mit gesteigertem w/z-Wert über die erwünschten 200 µm, die lediglich bei einem w/z-Wert von 0,4 erreicht werden.

Bei Verwendung des natürlichen Luftporenbildners "PANTAPOR 2020" ist eine ähnliche Entwicklung wie beim vorausgegangenen synthetischen Luftporenbildner zu erkennen. Auch hier fällt bei Betrachtung der Abbildung 6.55 auf, dass die Werte des gesamten Luftporenanteils gemessen im AVA deutlich unter den Ergebnissen der Luftporentöpfe liegen. Ebenso ist eine Steigerung des orange dargestellten Gesamtluftporenvolumens analog zu "PANTAPOR 66K" sichtbar. Auffällig ist jedoch, dass gemessen mit dem AVA der natürliche Luftporenbildner "PANTAPOR 66K" sichtbar. Auffällig ist jedoch, dass gemessen mit dem AVA der natürliche Luftporenbildner "PANTAPOR 2020" stets weniger Luftporenvolumen aufweist, als der synthetische "PANTAPOR 66K". In den vorrausgegangenen Messungen mithilfe der beiden Luftporenbildner, war diese Tendenz, wie in Abbildung 6.53 aufgezeigt, genau entgegengesetzt zu erkennen. Trotzdem stellt sich auch beim natürlichen Luftporenbildner bildner ein Mikroluftporengehalt (hellorange) von ca. 2 Vol.-% ein, unabhängig von der Veränderung des w/z-Wertes.

Somit ist zu erkennen, dass eine Steigerung des w/z-Wertes eine gleichmäßige Erhöhung des gesamten Luftporengehalts bewirkt. Der Anteil der relevanten Luftporen mit einem Durchmesser von kleiner 300 µm bleibt trotz Steigerung des w/z-Wertes konstant bei etwa 2 Vol.-%, während der Abstandsfaktor der Luftporen steigt. Dies ist auf die Wirkungsweise des Luftporenbildners zurückzuführen, der in Verbindung mit Wasser eine Hülle um die Luftporen darstellt. Es kann bei erhöhtem Wasseranteil mehr Wasser mit dem Luftporenbildner reagieren und somit eine größere Menge Luft binden.

Luftporengehaltsmessung in Abhängigkeit des Mischenergieeintrags

Nachfolgend werden die Auswirkungen des Mischenergieeintrags auf den Luftporengehalt im Frischbeton behandelt. Grundsätzlich sollte nach Zugabe aller Bestandteile die Mischzeit mindestens 45 Sekunden betragen.

Da in der Praxis jedoch auch Mischzeiten von weniger als 45 Sekunden üblich sind, wurde mit der nachfolgend erläuterten Versuchsreihe 3 die Auswirkungen einer kürzeren wie auch einer längeren Mischdauer auf die Luftporenbildung untersucht. In der Versuchsreihe 3 wurden als Parameter Mischzeiten von 30 Sekunden, 1 Minute, 2 Minuten, 4 Minuten und 10 Minuten untersucht.

Die Menge des Luftporenbildners wurde für die Versuchsreihe V3 ebenfalls so gewählt, dass laut Hersteller jeweils ein Luftporengehalt von 4,0 – 4,5 Vol.-% erzielt wird. Somit kann mit einem w/z-Wert von 0,42 und gleicher Menge der Luftporenbildner die Auswirkung der Mischzeit verglichen werden.

Versuchsreihe V3	Mischzeit	Volumen Luftporen in %					
		LP Topf		Super LP-Topf nach Bottke		AVA	
Luftporenbildner		66K	2020	66K	2020	66K	2020
V 3.1	30 sek	4,25	7,90	4,20	6,80	_ (1)	_ (1)
V 3.2	1 min	5,20 ⁽²⁾	8,25 ⁽²⁾	5,50	7,90	5,55	4,27
V 3.3	2 min	8,50	8,50	7,70	12,20	4,70	5,70
V 3.4	4 min	11,70	14,80	10,60	14,40	7,40	6,90
V 3.5	10 min	10,00	16,50	11,40	15,80	5,10	6,10

(⁽¹⁾ - keine Messung durchgeführt; ⁽²⁾ - gemittelter Messwert)

Abbildung 6-56: Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf, dem Super LP-Topf nach Bottke und dem AVA in Abhängigkeit der Mischdauer bei einem w/z-Wert von 0,42

Bei der ersten Betrachtung der Ergebnisse in Abbildung 6.56 wird deutlich, dass eine verlängerte Mischzeit einen deutlichen Anstieg der Luftporenmenge im Frischbeton sowohl bei Einsatz des natürlichen als auch synthetischen Luftporenbildners zur Folge hat. So fällt auch in Versuchsreihe 3 auf, dass der natürliche Luftporenbildner "PANTAPOR 2020", mit Ausnahme der Mischzeit von 2 Minuten gemessen im LP Topf, einen höheren Luftporengehalt bewirkt.



Abbildung 6-57: Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf in Abhängigkeit der Mischdauer bei einem w/z-Wert von 0,42

Zu erkennen ist ebenfalls, dass zum Erreichen der erzielten Luftporenmenge von ca. 5 Vol.-% nur kurze Mischzeiten, etwa zwischen 30 Sekunden und 1 Minute, nötig sind. In diesem Bereich steigt die Luftporenmenge nur leicht an, was zu einer relativ gut kontrollierbaren Menge des Luftporengehalts, abhängig von der Mischzeit, führt. Im Bereich zwischen 1 Minute und 4 Minuten Mischzeit entwickeln sich, wie die Abbildungen 6.57 und Abbildung 6.58 verdeutlichen, wesentlich mehr Luftporenvolumen als zuvor.



Super LP Topf nach Bottke - w/z-Wert 0,42

Abbildung 6-58: Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem Super LP-Topf nach Bottke in Abhängigkeit der Mischdauer bei einem w/z-Wert von 0,42

Mit beiden Grafiken wird deutlich, dass das Volumen der entstehenden Luftporen mit längerer Mischzeit nicht beliebig steigt, sondern ab einer bestimmten Zeit stagniert, bzw. sich sogar verringert. Vergleicht man den Anstieg des Luftgehaltes zwischen 4 und 10 Minuten, steigt der Luftporengehalt in 6 Minuten lediglich noch um bis zu 1,7 % an, während der Super LP-Topf nach Bottke in einer weiteren Minute Mischzeit zwischen V 3.2 und V 3.3 einen Anstieg von 4,3 % misst.

Nach 10-minütiger Mischzeit ist sogar ein sinkender Luftporengehalt bei Verwendung des "PANTAPOR 66K" zu erkennen. Dies bestätigt die Erkenntnis, dass bei einer zu langen Mischzeit kein weiteres Luftporenvolumen im Beton entsteht, sondern sich die einzelnen Luftporen zerstören und auflösen.

Auch in der Versuchsreihe V3 wurden zur Untersuchung der Auswirkung verschiedener Mischzeiten auf den Luftporengehalt aus dem verdichteten Frischbeton Proben zur weiteren Untersuchung mithilfe des AVA genommen. So sollte wie in der vorrausgegangenen Versuchsreihe herausgefunden werden, inwieweit sich die Dauer der Mischzeit nicht nur auf den Gesamtanteil der Luftporen auswirkt, sondern auch auf die Entwicklung der gewünschten Luftporen mit Durchmesser kleiner als 300 µm und den Abstandsfaktor. Hierzu wurden die Proben unterschiedlicher Mischzeiten abhängig von der Art der beiden Luftporenbildner im AVA untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in den Abbildungen 6.59 und 6.60 dargestellt.



Luftporenverteilung AVA - 66K

Abbildung 6-59: Ergebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung abhängig der Mischdauer für den LP-Bildner PANTHAPOR 66K



Abbildung 6-60: Ergebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung abhängig der Mischdauer für den LP-Bildner PANTHAPOR 2020

Betrachtet man den Verlauf des gesamten im AVA gemessenen Luftporenvolumens, ist tendenziell eine Erhöhung des Luftporengehalts mit verlängerter Mischzeit erkennbar. Sowohl bei Verwendung des natürlichen Luftporenbildners "PANTAPOR 2020" (Abbildung 6.60) als auch des synthetischen Luftporenbildners "PANTAPOR 66K" (Abbildung 6.59) ist festzustellen, dass bei einer Mischdauer von 10 Minuten der Luftporengehalt zurückgeht. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Luftporen bei zu langer Mischzeit zerstören und wieder auflösen. So zeigt sich, dass der gesamte Luftporengehalt bei einer Mischzeit von 10 Minuten gegenüber 4 Minuten abfällt. Ebenso ist, jeweils hellblau und hellorange dargestellt. Demgegenüber wird eine Erhöhung des Mikroluftporenanteils mit Luftporendurchmesser von weniger als 300 µm erkennbar, der sich jedoch, analog zum Gesamtanteil, bei zu langer Mischzeit wieder verringert. Grund hierfür dürfte sein, dass sich durch ein zu langes Mischen die Mikroluftporen wieder zu größeren Luftporen verbinden und diese anschließend zerstört werden.

Eine interessante Erkenntnis lässt sich bei der Betrachtung des Abstandsfaktors gewinnen. Dieser sinkt mit anhaltender Mischzeit und stabilisiert sich bei knapp unter 150 µm.

Umgekehrt ist ein zu hoher Abstandsfaktor bei kürzeren Mischzeiten erkennbar. Würde man den Trend bei 30 Sekunden Mischzeit weiterführen, würde sich wahrscheinlich ein noch höherer Abstandsfaktor einstellen, der im Straßenbau die Lebenszyklusdauer einschränken würde. Daher sollte zumindest mit dem "LABOR-ZWANGSMISCHER CEM 60 S ELBA" die Mischdauer mindestens 1 Minute betragen. Ob sich die Erkenntnis aus den Laborversuchen auch auf die großen Baustellenmischanlagen übertragen lassen, bleibt zu überprüfen.

Grundsätzlich sollten die Erkenntnisse in der Technikumsmischanlage überprüft werden. In Anbetracht der aber nur kurzen Zeitspanne, in denen die Technikumsanlage im Kontext der rheologiegestützten Mischprozessführung innerhalb der Projektlaufzeit genutzt werden konnte, konnten die Untersuchungen zum Einfluss des Mischenergieeintrags auf die Luftporenbildung nur bedingt analysiert werden.

6.1.3.3 Charakterisierung der steifen Frischbetone mit dem Gyrator

Um die rheologischen Eigenschaften von Fahrbahnbetonen unter realitätsnahen Verdichtungsbe-dingungen analysieren zu können, wie diese beim Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger zu erwar-ten sind, wurde ein Gyrator vom Typ "Galileo Gyratory Compactor for cement and concrete 54-C20C02-C20C04" beschafft. Mit dem Einsatz des Gyrators sollten bestehende Unsicherheiten bei der Bewertung der Ergebnisse klassischer Frischbetonprüfungen, so der Bestimmung des Aus-breitmaßes bzw. des Verdichtungsmaßes, vermieden werden. Beim Fahrbahnbeton handelt es sich um "zero-slump-concrete", dessen Grünstandfestigkeit mit der Verdichtung des eingebauten Betons mit dem Gleitschalungsfertiger erreicht wird.

Der beschaffte Gyrator verfügt über einen elektromechanischen Kreiselverdichter. Dieser ist für Betone nach der skandinavischen Prüfnorm NT BUILD 427 ausgelegt und erlaubt eine intensive Verdichtung, speziell für die Prüfung von steifem Frischbeton. Steife bis erdfeuchte Betone weisen ein nur geringes Setzmaß auf, das auf den niedrigen Wasserzementwert und die sehr geringe bzw. nicht vorhandene Fließfähigkeit zurückzuführen ist. Solche Frischbetone verfügen über eine hohe Grünstandfestigkeit, wie diese beim Einbau mit einem Gleitschalungsfertiger beim Fahrbahnbeton eingefordert wird. In der Betonindustrie kommt der Gyrator vor allem zur Qualitätskontrolle in Werken der Betonwarenherstellung zum Einsatz.

Die Verdichtung wird durch die gleichzeitige Anwendung von Druckkraft, resultierend aus dem An-pressdruck, von Fliehkräften, entstehend aus den Umdrehungen und einer Scherwirkung erreicht. Diese wird durch die Auslenkung der Mittellinie des Probekörpers von der unteren Stirnplatte um Null bis drei Grad erzielt. Die Auslenkung führt zu einer konischen Rotation des Probekörpers. Der Winkel zwischen der ursprünglichen Mittelachse und der neuen Mittelachse, der als Neigungswinkel bezeichnet wird, lässt sich im Gyrator wählbar einstellen.

Der Gyrator erlaubt, Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und 200mm einzubauen und zu analysieren. Die minimal prüfbare Höhe einer Frischbetonprobe liegt bei 50mm und die maximale Probenhöhe bei 200mm. Im Prüfbetrieb kann mit dem Gyrator die Entwicklung der Probendichte in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen und der einwirkenden Kraft bestimmt werden. Das Ergebnis wird in einer Verdichtungskurve aufgezeigt. Die Ergebnisdiagramme zeigen so die Abnahme der Probenkörperhöhe und die Zunahme der Dichte in Abhängigkeit der Umdrehungszahl dargestellt werden. Die durchgeführten Versuche zeigen bereits bei einer kleinen Änderung der Zugabe von Wasser oder Fließmittel, dass sich die Lage des Knickpunktes der Verdichtungskurve, der den maximalen Scherwert kennzeichnet, deutlich verschiebt. Wird die Wasserzugabe verringert, verschiebt sich der maximale Scherwert in Richtung höherer Verdichtung. Wird die Wassermenge erhöht, verschiebt sich der maximale Scherwert in Richtung der ersten Kreiselzyklen. Zahlreiche Versuche wurden von [Bockius 2018] und [Sladakovic 2020] durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass für Fahrbahnbetone ein Verdichtungswinkel von 2,3 ° anzusetzen ist. Es wurde erwartet, dass mit dem modifiziertem Antriebsstrang der Technikumsmischanlage im Zuge der rheologiegestützten Mischprozessführung der Verdichtungswinkel noch weiter hätte reduziert werden können. Dies konnte mit den im Zuge der Betonagen für den Einsatz des Experimentalprüfstands aber nicht bestätigt werden. Grundsätzlich sollen daher in künftigen Vorhaben im Kontext von Fahrbahnbetonen die Arbeiten mit dem Experimentalprüfstand fortgesetzt werden, da die mit dem Gyrator gewonnenen Ergebnisse relevante Rückschlüsse auf die Verdichtbarkeit der Fahrbahnbetone erlauben. Allerdings bedarf es einer tiefergehenden Analyse der Zusammenhänge zwischen den mittels Gyrator gewonnenen Kenngrößen und den Einbauergebnissen der Verdichtereinheiten des Gleitschalungsfertigers, wie diese in der Offset-Schalung des Experimentalprüfstands verfügbar sind und zur Durchführung derartiger Versuche genutzt werden können.

6.1.3.2 Liebherr Labormischer DW0.06/100

Die Analysen im Feld sowie im Technikum zeigen deutlich, dass zur Steigerung der Qualität und Dauerhaftigkeit der Fahrbahnbetone ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden muss. Insbesondere zur Sicherstellung der Projektziele, Skalierbarkeit und Übertragbarkeit wurde ein Labormischer konzipiert und umgesetzt, vergleiche Abschnitt Versuchsaufbauten im Anhang 15.2. Die Integration des Doppelwellenlabormischers (Nutzinhalt 60Liter) ermöglicht hierbei die Durchführung erweiterter Laborversuche und stellt die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse vom Labor in die Baupraxis sicher.

Dabei bilden die Labormischer die Schlüsseltechnologie, um die Brücke zwischen innovativen Methoden zur Modellierung und Simulation von dynamischen Prozessen, die experimentelle Validierung im Labor und der Implementierung der Ergebnisse in der realen Applikation.



Abbildung 6-61: Grundidee: Liebherr der mischtechnische Kompetenz- und Lösungsanbieter

Um eine reproduzierbare Durchführung der Versuche zu ermöglichen, wurde hierzu ein neues Steuerungskonzept realisiert. Neben grundlegenden Funktionalitäten, wie

- Not-Aus des gesamten Mischers
- Wahl zwischen Hand und Trajektorie Betrieb
- Start des Mischwerkes / der Trajektorie
- Mischwerk ausschalten
- Anzeige einer aktiven Trajektorie
- Anzeige einer Störung

- Potentiometer zur Drehzahlregelung
- Reset Stand-Sicherheit

wurde hierbei ein Trajektorien-Modus implementiert. Im Trajektorien-Modus kann über ein User-Interface eine spezifizierte Anzahl an Geschwindigkeiten eingegeben werden. Dabei kann zwischen

- 1. Zeitoptimales Verfahren zwischen den Geschwindigkeiten
- 2. Vorgabe der Zeitspannen und von definierten Drehzahlen
- 3. Vorgabe der Anzahl an Umdrehungen und der Geschwindigkeit

unter Berücksichtigung einer maximalen Beschleunigung und Ruck (C²-stetige Trajektorie). Abbildung 6.62 zeigt das Ablaufdiagramm des Trajektorien-Modus respektive den Versuchsablauf.



Abbildung 6-62: Ablaufdiagramm

Der in 2018 entwickelte Labormischer wurde in 2019 fertiggestellt und für den Einsatz im Versuch um Dosiereinrichtungen erweitert, Abbildung 6-63. Die entwickelten Dosiereinrichtungen erlauben die exakte und reproduzierbare Dosierung von Zement und Zuschlagstoffen in den Mischprozess. Erste Versuche zum Mischverhalten und zur rheologischen Mischprozessführung wurden durchgeführt (Abbildung 6-64).



Abbildung 6-63: Labordoppelwellen Mischer mit Aufsatz zur Beschickung



Abbildung 6-64: Beton im DW-Labormischer

Die Steuerung des Labormischers wurde für den Laborprozess optimiert und ermöglicht die Messung von Prozesses-Signalen sowie die Definition wiederholbarer Mischprozesse. Hierzu wurde eine HMI entwickelt, die den Betrieb innerhalb eines Laborprogramms unterstützt. Die Sequenzen eines Mischprozesses können definiert und gespeichert werden (Abbildung 6-65). Hiermit ist es möglich definierte Mischprozesse wiederholt zu fahren und reproduzierbare Testbedingungen zu schaffen, die eine Vergleichbarkeit von Resultaten ermöglichen.



Abbildung 6-65: Definition von Sequenzen eines Mischprozesses innerhalb der Labormischer HMI

Tiefergreifende Analysen und Modellierungsansätze werden auf Basis dieses Labormischers in Kapitel 7.1.2.2 diskutiert.

Des Weiteren werden mittels des Labormischers gekoppelte DEM-MKS Simulationen durchgeführt, um sowohl das realitätsnahe lastabhängige Maschinenverhalten als auch das Mischgut mit seinen spezifischen Eigenschaften abzubilden. Hierzu wurde in einer ersten Phase eine Schnittstelle zwischen der DEM-Software LIGGGHTS[®] und einem Maschinenmodell (Matlab/Simulink) als Functional Mock-Up Unit (FMU) implementiert. Als Simulationsergebnisse werden im weiteren Verlauf Videos zur Bewertung der Gutbewegung im Mischer und Drehzahl-, Drehmomenten und Motorleistungsverläufe über der Simulationszeit erstellt. Diese Simulationen werden ausgehend von einem leicht zu modellierenden Mischgut (Betonkies 2/8) systematisch auf Fahrbahnbetone erweitert.

6.1.3.3 Bestimmung des Feuchtegehalts der Ausgangsstoffe

Eine robuste und exakte Erfassung des Wassergehaltes der Ausgangsstoffe innerhalb des Dosierprozesses, ist essenziell für die Qualität des hergestellten Betons.

Einer der größten Einflussfaktoren auf die Frischbetonqualität ist die an der Gesteinskörnung haftende Feuchte. Bei der Feuchte wird unterschieden zwischen der Kernfeuchte und der Oberflächenfeuchte des Zuschlags. Die Kernfeuchte bezeichnet das Wasser im inneren der Körnung. Dieses Wasser in den Kornporen kommt nicht in Verbindung mit dem Zement. Dieses Wasser hat somit keinen oder einen nur sehr geringen Einfluss auf den w/z- Wert. Das Oberflächenwasser hingegen, also das Wasser, dass auf der Kornoberfläche haftet, hat hingegen einen erheblichen Einfluss auf den w/z-Wert. Die Gesteinskörnung wird in den meisten Fällen nicht trocken gelagert, weshalb die Oberflächenfeuchte der Körnung variiert. Daher sollte der Feuchtegehalt der Gesteinskornfraktionen genau auf die Mischungszusammensetzung des Betons abgestimmt und ermittelt werden. Dies kann mithilfe von Feuchtemesssonden bei der Einwaage der Gesteinskörnung geschehen. Ungenauigkeiten können negative Auswirkungen auf den Luftporengehalt, auf die Verarbeitbarkeit, die Konsistenz, die Festigkeit, die Dauerhaftigkeit und somit auf die spätere Qualität des Betons haben. Die elektronische Erfassung der Feuchte der Gesteinskornfraktionen im Laufe der Dosierung ist daher ein wichtiger Aspekt, weshalb sich die Untersuchungen sowohl im Technikum der Fa. Liebherr wie auch am IWB der Analyse der Feuchtemessung im Vorhaben vertieft angenommen haben. Zur Feuchtebestimmung der zu dosierenden Gesteinskörnungen wurden entsprechende Feuchtesensoren installiert. Neben der in den Liebherr Mischanlagen verbauten Liebherr-Feuchtesonde ist an zwei Siloauslässen in der IWB-Technikumsanlage zudem eine Feuchtesonde von Ludwig sowie eine TDR-Feuchtesonde von IMCO verbaut. Die Messsignale wurden auf die Liebherr-Anlage verdrahtet, so dass diese über die OPC UA-Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden können. Allerdings bedarf es noch weiterer Überlegungen, wie die beiden Sondenarten von IMCO und Ludwig vor der Dosierung de Gesteinskörnungen wieder auf Null gesetzt werden können, um die Signale im Nachgang in den vergleichen-den Auswertungen bewerten zu können.

Bestimmung der Materialfeuchte auf der Baustelle

Einen maßgebenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Qualität von Fahrbahndecken aus Beton haben sowohl der Luftporen- als auch der Wassergehalt. Die durchgeführten Baustellenanalysen haben mehr als deutlich gezeigt (vgl. Abschnitt 5.2.2.1), dass diese essenziellen betontechnologischen Kennwerte in den dort eingebauten Frischbetonen erheblichen Schwankungen unterliegen. Dabei wurde zudem ersichtlich, dass neben der Erfassung des Wassergehalts der Gesteinskörnungen für die davon abhängende Anpassung der Dosierung des Zugabewassers auch die spätere Bestimmung des tatsächlichen Wassergehalts sowie des LP-Gehalts mit signifikanten Defiziten einhergehen.

In Anbetracht dieser Umstände und der Tatsache, dass ein definierter und gleichzeitig dann auch möglichst konstanter Wasser- sowie LP-Gehalt elementar für die an Betonfahrbahnen gestellten hohen Anforderungen ist, wurde vom IWB Kontakt zu verschiedenen Herstellern von Feuchtemesstechniken für Mischanlagen aufgenommen. Im Zuge dessen wurde in Laborversuchen zur Bestimmung des Wassergehalts im Frischbeton auch die Genauigkeit von konventionellen bzw. analogen Prüfmethoden (Baustellen-Darrversuch, Mikrowellen-Darren) und digitalen Messgeräten (auf Mikrowellen- und Radar-Basis) untersucht. Hierzu wurde die von der Fa. Schnorpfeil auf der BAB 1 Wittlich-Salmtal eingebaute Betonrezeptur inklusive der verwendeten Ausgangsstoffe herangezogen. Unter Berücksichtigung der im IWB Labor-Zwangsmischermischer (System Elba Einwellenmischer CEM 60 S mit 60 Liter Mischansatz) anderen genutzten Mischwerkzeugs musste jedoch die Betonzusammensetzung hinsichtlich der Zusatzmittelmenge geringfügig verändert werden, um den angestrebten LP-Gehalt einzuhalten. Neben dem ursprünglich vorgegebenen w/z-Wert wurde dieser zudem noch gesteigert als auch reduziert, um einen Einfluss der daraus bedingten Veränderungen in der Konsistenz auf die Messwerte zu untersuchen. Des Weiteren wird in Laborversuchen entgegen der Baupraxis mit ofengedarrten Gesteinskörnungen gearbeitet, um mit den tatsächlich bekannten Wassergehalten im Frischbeton die Messwerte der unterschiedlichen Messmethoden validieren zu können. Zusätzlich als eine alternative "Prüfmethode" ist die Ermittlung des Wassergehalts anhand der Stoffraumrechnung und unter Zunahme der durch den herkömmlichen LP-Topf sowie den Super LP-Topf nach Bottke [Bottke 2016] ermittelten LP-Gehalten und Rohdichten in den Untersuchungen von Betonfahrbahn 4.0 vorgenommen worden.



Abbildung 6-66: Vergleich analoger und digitaler Prüfmethoden zur Bestimmung des Ist-Wassergehalt im Frischbeton

Aus den Untersuchungen ging hervor, dass die beim Darrversuch ermittelten Messwerte, wie bereits auf allen Baustellenanalysen zu sehen war, kontinuierlich und erheblich über dem tatsächlich vorhandenen Wassergehalt gelegen sind und somit keine eindeutigen Aussagen über den Ist-Wassergehalt getroffen werden konnten. Das Mikrowellen-Darren ergab ebenfalls zu hohe Ist-Wassergehalte. Jedoch waren die Messwerte deutlich näher am Soll-Wert als beim Darrversuch. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Zeit des Erreichens der Massekonstanz beim Mikrowellen-Darren in Abhängigkeit des w/z-Werts zwischen 30 und 50 Minuten lag. Die Prüfzeiten beim Darrversuch bewegten sich mit 20 bis 30 Minuten in einem ähnlichen Bereich. In Anbetracht einer sich daraus resultierenden Reaktionsträgheit, unabhängig des eingesetzten Prüfverfahrens, hinsichtlich einer raschen Dosierungskorrektur sowie der signifikanten Ungenauigkeit beim Darrversuch, sollte zwingend der Einsatz dieser Bewertungsmethode für den Wassergehalt im Frischbeton überdacht werden. Die digitalen Feuchtemessgeräte zeigten dagegen eine andere Güte an Messwerten [Budur 2018]. Sowohl die Mikrowellen-Sonde FL ProfiCheck (Kalibrierung über 2 Referenz-Feuchtegehalte) als auch die Radar-Sonde SONO-WZ (Kalibrierung über einstellbare definierte Parameter) gaben mit Prüfzeiten von wenigen Minuten Messwerte aus, die dem Soll-Wert bis auf wenige Liter genau entsprachen. Es zeigt sich jedoch, dass sehr steife Betone aufgrund der schlechteren Verdichtbarkeit und den damit einhergehenden größeren Lufteinschlüssen im Erfassungsbereich der Sonde vermehrt zu Messungenauigkeiten führen. Zusätzlich wurde die Bestimmung des Wassergehalts anhand der Stoffraumrechnung zusammen mit den ermittelten LP-Gehalten mit dem konventionellen LP-Topf und dem Super LP-Topf nach Bottke durchgeführt.

Liebherr Prüfstand zur Feuchtemessung

Der Wassergehalt der Ausgangsstoffe, insbesondere von Sand wird dabei über Feuchtesensoren während des Dosierprozesses erfasst. Die Messwerte der Sensorik sind üblicherweise nichtlinear monoton in Hinsicht auf den tatsächlichen Wassergehalt. Aus diesem Grund müssen materialspezifische Kalibrierkurven erstellt werden, die eine genaue Auswertung zulassen. Neben der Erarbeitung einer Methodik zur Erfassung der Kalibrierkurven im Labor wurde im Liebherr-Technikum auch ein Versuchstand zur Untersuchung des Messverhaltens der Sensoren im Materialfluss aufgebaut. Anhand dieses Versuchstandes konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Einbauposition der Feuchtesensoren untersucht und die Konstruktion optimiert werden.

Die Erkenntnisse wurden auf die Anlage der Firma Schnorpfeil übertragen.

Im Liebherr-Technikum wurde ein Prüfstand zur Messung der Feuchte im Prallblech-Prinzip geplant und in Betrieb genommen (Abbildung 6.67). Der Prüfstand verfügt über einen Hochschacht mit einem Volumen von 130 I. Die Entleerzeit beträgt etwa 6 s, durch einen Rüttler (Abbildung 6-68) kann die Brückenbildung des Materials innerhalb des Auslaufs verhindert und ein kontinuierlicher Materialfluss sichergestellt werden.



Abbildung 6-67: Feuchteprüfstand im Liebherr-Technikum



Abbildung 6-68: Rüttler und Auffangbehälter des Feuchteprüfstandes

Mit Hilfe des Feuchteprüfstandes konnten unterschiedliche Aspekte der Feuchtemessung innerhalb einer kontrollierten und reproduzierbaren Umgebung durchgeführt werden. In der Arbeit [Wu 2019] wurde der Feuchtemessprozess und die Methodik zur Feuchtemessung am Prüfstand analysiert und optimiert. Es wurde ein statisches Messverfahren zur Erfassung der Materialfeuchte erarbeitet und mit dynamischen Messungen am Prüfstand verglichen. Vereinfacht dargestellt wird für die statische Messung der Aufsatz aus Abbildung 6-69 mit dem zu testen Material gefüllt und dieses unter kontrollierten Bedingungen im Labor verdichtet. Die gemessenen Feuchten ergeben eine statische Materialabhängige Kalibrierkurve. Diese muss dann an die dynamische Messung im Prozess angepasst werden.



Abbildung 6-69: Aufsatz zur statischen Messung der Materialfeuchte

Wie in Abbildung 6-70 dargestellt, kann die statische Messung schlüssige Ausgangskalibrierkurven liefern. Die Ergebnisse sind zu dynamischen Messungen vergleichbar. Bei der Inbetriebnahme an der Mischanlage kann die statische Kalibrierkurve anhand weniger Messungen über einen einfachen Offset an die reale dynamische Einbausituation angepasst werden. Das Verfahren ermöglicht es statische Kurven für unterschiedliche Materialien unter Laborbedingungen zu entwickeln und diese mit vertretbarem Aufwand an der realen Anlage umzusetzen. So kann die Feuchte Sensorik deutlich besser kalibriert und damit die Genauigkeit der berechnete Feuchtewerte verbessert werden.



Abbildung 6-70: Vergleich statischer und dynamischer Messkurven zur Validierung der Kalibrierkurven

Neben der Materialsorte konnte in unterschiedlichen Messungen auch beobachtet werden, dass innerhalb der dynamischen Messung die Position des Sensors und die Einbausituation einen deutlichen Einfluss auf die

Qualität des gemessenen Feuchtesignals hat (Abbildung 6-71). Um dies genauer zu untersuchen, wurden Sensoren an unterschiedlichen einbauorten innerhalb der Dosierrutsche verbaut (Abbildung 6-71). Neben der Position der Sensoren wurde die Geometrie des Prallbleches untersucht. Die Sensorpositionen S1 und S4 befinden sich relativ zur Fischmaulöffnung an der gleichen Position, weisen nur eine geänderte Materialführung auf.



Abbildung 6-71: Unterschiedliche Sensorpositionen der Feuchtesensoren unterhalb der Dosieröffnung

Zu Testzwecken wurde nun die Feuchte von Sand an den unterschiedlichen Positionen gemessen. Es ergeben sich die in Abbildung 6-72 dargestellten Kalibrierkurven für die einzelnen Sensorposition (S1-S4). Die höchste Sensitivität in Hinsicht auf die reale Feuchte liefert dabei die Position S1. Die Sensorposition S4 zeigt eine deutlich geringere Sensitivität gegen die Feucht, alleine aufgrund der Geometrie des Auslasses.



Abbildung 6-72: Auswirkung der Sensorposition auf die erfassten Feuchtewerte bei Sand a+b

Testreihen mit Schnorpfeil-Sand und a+b-Sand

Zur Übertragung der Ergebnisse am Feuchteprüfstand auf die reale Anlage, wurde die Kalibrierkurven zwischen dem Verwendeten Sand der Firma a+b mit Materialproben der Firma Schnorpfeil verglichen (siehe Abbildung 6-73). Die Kalibrierkurven zeigen grundsätzlich das gleiche Verhalten und sind bis auf einen Offset vergleichbar. Sie liegen 1-2 % Feuchte auseinander, dieser Offset kann aber durch eine Verschiebung der gemessenen Kurve (a+b) kompensiert werden. Die Materialproben der Fa. Schnorpfeil weisen eine geringfügig größere Standardabweichung von 0,4 6% zur Kalibrierkurve auf als das a+b Material (0,26 %).



Abbildung 6-73: Feuchtemessung Kalibrierkurven Schnorpfeil und a+b

Eine Analyse der Sieblinien (vgl. Abbildung 6-74) für die beiden Materiale zeigt, dass beide vergleichbar sind. Der a+b Sand ist aber etwas feinteilreicher. Die Vermutung liegt nahe, dass der erhöhte Rauschanteil der Schnorpfeil-Feuchtemessung in der geringfügig gröberen Zusammensetzung begründet ist.



Abbildung 6-74: Sieblinien a+b Sand zu Schnorpfeil

Um das Verhalten und die Abhängigkeiten der Feuchtemessung von Materialzusammensetzung, Einbauposition und Materialflussdynamik weiter zu analysieren, sind weitere Messungen am Feuchteprüfstand und in den realen Anlagen geplant.

Optimierung an der Mischanlage Schnorpfeil

Um die Ergebnisse der Versuche am Feuchtemessprüfstand auf die reale Anlage zu übertragen, wurde der Materialfluss der Anlage optimiert. Durch eine Verdoppelung der Rüttler-Wirkung konnte die auftretende Brückenbildung im Materialfluss unterbunden werden. Die Fischmaulseite ohne Rüttler wurde dabei stillgelegt. Dies führt im Regelfall zu einer Verlängerung der Messdauer bei Sand von 2 s auf 4 s, bzw. von 4 s auf 6 s, welche aber auf die Gesamtprozessdauer keinen Einfluss hat. Durch die verlängerte Dosierzeit ist eine verbesserte Auswertung des Feuchtemesssignales im Prozess möglich. Die Messbleche wurden entsprechend er vorgehenden Ergebnisse verschoben und flacher eingestellt (Abbildung 6-75).



Abbildung 6-75: Prallblech unter Fischmaulöffnung bei Schnorpfeil Anlage



Abbildung 6-76: Vergleich der Sensor-Kalibrierkurve auf Anlage der Fa. Schnorpfeil

Eine Analyse der verwenden Kalibrierkurve auf der Anlage zeigte das hier Verbesserungsmöglichkeiten vorhanden waren, siehe Abbildung 6-76. Zu diesem Zweck wurde auf dem Feuchteprüfstand eine Grundkalibrierkurve mit Proben des Sandes der Baustelle Wittlich durchgeführt. Die Standardabweichung über 36 Messungen beträgt 0,5 % (blaue kurve). Auf der Baustelle wurden 21 Proben an 2 verschiedenen Verschlüssen genommen (rote Punkte). Die Kalibrierkurve wurde zur Anpassung um 0,3 % verschoben (gelbe Kurve). Die sich ergebende Kurve wurde als Kalibrierkurve in der Anlage hinterlegt.

6.1.3.4 Charakterisierung der steifen Frischbetone mit dem Gyrator

Um die rheologischen Eigenschaften des Fahrbahnbetons unter realitätsnahen Verdichtungsbedingungen, wie diese beim Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger zu erwarten sind, wurde ein Gyrator vom Typ "Galileo Gyratory Compactor for cement and concrete 54-C20C02-C20C04" beschafft. Im Verbundvorhaben sollte untersucht werden, ob mit dem Gyrator bestehende Unsicherheiten bei der Bewertung der Ergebnisse klassischer Frischbetonprüfungen, so der Bestimmung des Ausbreitmaßes bzw. des Verdichtungsmaßes, vermieden werden können. Schließlich lässt sich mit den bekannten Frischbetonprüfungen das Grünstandverhalten von Frischbetonen mit steifer bis erdfeuchter Konsistenz nur begrenzt zuverlässig bewerten. Da es sich bei Fahrbahnbeton aber um einen sogenannten "zero-slump-concrete" handelt und die Bestimmung und Bewertung der Grünstandfestigkeit in der Größenordnung der Verdichtung beim Einbau durch einen Gleitschalungsfertiger liegen sollte, wurden nach der Beschaffung des vorgenannten Gerätetyps entsprechende Untersuchungen vorgenommen.

Kurze Beschreibung des Geräts und der Durchführung der Prüfung

Bei dem beschafften Gyrator (vgl. Abbildung 6-27), der von der Firma Controls hergestellt wird, handelt es sich um einen elektromechanischen Kreiselverdichter. Dieser ist für Betone nach der skandinavischen Prüfnorm NT BUILD 427 ausgelegt und erlaubt eine intensive Verdichtung, speziell für die Prüfung von steifem Frischbetonen. Da steife bis erdfeuchte Betone ein nur geringes Setzmaß aufweisen, was auf den niedrigen Wasserzementwert und die sehr geringe bzw. nicht vorhandene Fließfähigkeit zurückzuführen ist, verfügen solche Frischbetone aber über eine hohe Grünstandfestigkeit, wie diese beim Einbau mit einem Gleitschalungsfertiger beim Fahrbahnbeton eingefordert wird. Im Bereich der Betonindustrie kommt der Gyrator vor allem zur Qualitätskontrolle in Fertigteilwerken von Betonwaren zum Einsatz.

Die Verdichtung wird mit dem Gyrator durch die gleichzeitige Anwendung von Druckkraft, resultierend aus dem Anpressdruck, von Fliehkräften, entstehend aus den Umdrehungen und einer Scherwirkung erreicht. Diese beruht auf der Auslenkung der Mittellinie des Probekörpers von der unteren Stirnplatte um Null bis drei Grad. Die Auslenkung führt zu einer konischen Rotation des Probekörpers, die in der rechten Darstellung von Abbildung 6-77 verdeutlicht ist. Der Winkel zwischen der ursprünglichen Mittelachse und der neuen Mittelachse, der als Neigungswinkel Φ bezeichnet wird, kann im Gyrator eingestellt werden.



Abbildung 6-77: links: Gyrator des rechts: Konische Ro

Gyrator des Herstellers Control vom Typ Galileo Konische Rotationsfläche des Probekörpers

Im Gyrator können Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und 200mm eingebaut werden. Die minimal prüfbare Höhe einer Frischbetonprobe liegt bei 50mm und die maximale Probenhöhe bei 200mm. Im Prüfbetrieb kann der Gyrator die Entwicklung der Probendichte in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen und der einwirkenden Kraft bestimmen. Das Ergebnis wird in einer Verdichtungskurve aufgezeigt. Hier wird nach jeder Umdrehung die Probenhöhe in mm, die Druckkraft in kN, das Drehmoment in Nm sowie die Probendichte in kg/m³ aufgezeigt und die Verdichtungskurve bestimmt. In den Ergebnisdiagrammen kann die Abnahme der Probenkörperhöhe und die Zunahme der Dichte in Abhängigkeit der Umdrehungszahl dargestellt werden. Die durchgeführten Versuche zeigen bereits bei einer kleinen Änderung der Zugabe von Wasser oder Fließmittel, dass sich die Lage des Knickpunktes der Verdichtungskurve, der den maximalen Scherwert kennzeichnet, deutlich verschiebt. Wird die Wasserzugabe verringert, verschiebt sich der maximale Scherwert in Richtung höherer Verdichtung. Wird die Wassermenge erhöht, verschiebt sich der maximale Scherwert in Richtung der ersten Kreiselzyklen.

Durchführung von Untersuchungen am Beispiel von Unter- und Oberbeton

In den beiden Diagrammen der Abbildung 6-78 und Abbildung 6-79 ist jeweils die Verdichtungskurve für einen Unter- und einen Oberbeton dargestellt.



Abbildung 6-78: Verdichtungskurve für den Unterbeton



Abbildung 6-79: Verdichtungskurve für den Oberbeton

Entsprechend zahlreicher Vorversuche, die im Rahmen zweier studentischer Arbeiten im Verbundvorhaben durchgeführt wurden, konnte für die Durchführung der Prüfungen mit dem Gyrator ein Verdichtungswinkel für die Fahrbahnbetone von 2,3 ° angesetzt werden. Dabei soll der Verdichtungswinkel in den weiteren Versuchen, die im Zuge der Frischbetonanalysen der mit der Technikumsanlage mit modifiziertem Antriebsstrang hergestellten Betone durchgeführt werden sollen, der Verdichtungswinkel noch weiter reduziert werden.

Die beiden in Abbildung 6-78 und Abbildung 6-79 dargestellten Verdichtungskurven verdeutlichen, dass sich bei der Analyse des Unterbetons der Knickpunkt der Verdichtungskurve bei etwa 40 Umdrehungen einstellt und hier eine Rohdichte von etwa 2510 kg/m³ erreicht wird. Demgegenüber stellt sich der Knickpunkt beim Oberbeton bereits bei 20 bis 25 Umdrehungen ein.
	Druckkraft	Umdrehung	Umdrehungs	Neigungs	Rohdichte
	(kPa)	sanzahl (-)	geschwindigk	winkel (°)	(kg/m³)
			eit (U/min)		
Oberbeton	115	60	60	2,283	2429,5
	110	60	60	2,283	2418,9
	115	60	60	1,7	2421,3
	115	60	60	2,7	2434
	135	30	30	2,283	2429
	100	90	90	2,283	2422
	105	90	90	2,283	2428
Unterbeton	220	60	60	2,283	2511,8
	210	90	90	2,283	2508,9

Tabelle 6.31: Ausgangswerte der Grundeinstellung und Messergebnisse für den Unter- und Oberbeton

Beiden Kurvenverläufen ist gemeinsam, dass die Rohdichte zunächst rasch zunimmt und nach dem Erreichen des Knickpunktes die Rohdichte asymptotisch einem Endwert entgegenstrebt. Die sich beim Knickpunkt zu verzeichnende Rohdichte stimmt sowohl beim Unter- als auch beim Oberbeton recht gut mit den sich aus den Mischungsentwürfen der beiden Gemische ergebenden theoretischen Frischbetonrohdichte überein. Im Rahmen der studentischen Untersuchungen wurden die Umdrehungsgeschwindigkeiten, die Verdichtungswinkel wie auch die Dauer der Verdichtung variiert. Am günstigen erwies sich für Fahrbahnbetone eine Umdrehungsgeschwindigkeit von 30 U/min bis 60 U/min. Werden die Druck-kräfte zu stark gewählt, kann es infolge der hohen Verdichtungswirkung zum Austreten von Zementleim führen. Kommen große Gesteinskörnungen wie beim Unterbeton zum Einsatz, wird eine höhere Verdichtungsleistung notwendig als bei feineren Betongemischen, wie diese beim Oberbeton gewählt wer-den.

In Tabelle 6-31 sind die Ausgangswerte, wie sie in den studentischen Arbeiten gewählt und gemessen wurden, für den untersuchten Unter- und Oberbeton zusammengestellt. Dabei lässt sich den Parametereinstellungen für den Oberbeton ableiten, dass bei einer Reduktion der Umdrehungsgeschwindigkeit von 60 U/min auf 30 U/min bei gleicher Verdichtungsdauer auf eine Minute eine Erhöhung der Druckkraft um 20 kPa erforderlich wird. Passend reduziert sich die erforderliche Druckkraft um 10 kPa, sobald die Umdrehungsgeschwindigkeit von 60 U/min auf 90 U/min gesteigert wird. Hingegen hat eine Veränderung des Verdichtungswinkels einen nur geringen Einfluss auf den Verlauf der Verdichtungskurve und damit die Rohdichte.

6.1.4 B1.4 - Optimierung des Antriebsstranges der rheologischen Mischprozessführung

In enger Zusammenarbeit mit den Firmen CAVEX und Liebherr wie auch dem Partnerinstitut ISYS wurde am IWB eine Optimierung des Antriebsstrangs durchgeführt. Von CAVEX wurde ein neues Getriebe entwickelt, das im Rahmen des Verbundvorhabens in einem ersten Prototyp in der Tech-nikum-Doppelwellenmischanlage der Fa. Liebherr am IWB verbaut und in seiner Wirkung und Leis-tungsfähigkeit unter realmaßstäblichen Herstellbedingungen erprobt werden konnte. Anstelle des serienmäßigen 45 kW Motors wurde für die Technikumsanlage ein Servomotor mit 75 kW Leistung verbaut. Mit diesem werden die beiden Mischwellen des Doppelwellenmischers angetrieben.

6.1.5 B1.5 - Technikummaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen

6.1.5.1 Bauliche und technische Vorbereitungen in der Halle und Installation der Liebherr-Mischanlage und Abwasserreinigungsanlage

Zur Aufstellung der Liebherr-Doppelwellenmischanlage DW 1.25 musste die Technikumhalle umfas-send umgebaut und statisch ertüchtigt werden. Die Maßnahmen umfassten einen hohen Aufwand an nicht vorhersehbaren baulichen und installationstechnischen Maßnahmen zur Ertüchtigung der Versuchshall, die von den seitens der Bauverwaltung eingeschalteten Fachplanern nicht vorhergesehen wurden. Der unterkellerte Hallenboden musste statisch-konstruktiv nachgegründet werden. Zudem mussten einige Durchbrüche in der Hallenaußenwand vorgenommen werden, um den Beschicker der Mischanlage betreiben zu können. Weitere bauliche Maßnahmen erforderte die Aufstellung der Taschensiloanlage nebst der Aufstellung des Zementsilos. Beide Installationen erforderten umfassende Gründungsmaßnahmen.

Im Winter 2018/2019 wurde die Doppelwellenmischanlage in der Technikumhalle installiert und in einem ersten Probebetrieb geführt. Allerdings konnte die Bearbeitung der Arbeitspakete des Ver-bundvorhabens noch nicht systematisch gestartet werden, da zunächst die genehmigungsrechtlich erforderliche Abwasserreinigungsanlage in Betrieb genommen werden musste. Zudem erforderte die Fertigstellung der Elektroinstallationen noch ein weiteres Jahr, so dass die Restbetonaufbereitungsanlage erst im Herbst 2020 die Abwasseranlage vollständig in Betrieb gehen konnte. Die realmaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen konnte erst von Oktober 2020 an beginnen.

Zunächst wurden die Versuchsreihen mit dem Standardantriebsstrang durchgeführt, um die Leis-tungsmerkmale des Frisch- und Festbetons bei einem Betrieb mit dem konventionellen Antriebs-strang mit einem 45 kW Asynchronmotor zu erproben. Entgegen der Standardanlage wurde aber bereits der verbaute Frequenzumrichter eingebunden, so dass die Versuche mit dem Standardantrieb auch unter Einbezug der Messdaten von Motornennmoment und Motordrehzahl ausgewertet werden können.

Zur Einweisung und Erprobung aller Anlagenkomponenten stellte Fa. Liebherr einen erfahrenen Mischmeister und Mechaniker bereit. Auch die Fa. Schnorpfeil stellte für den Zeitraum der Einwei-sung einen äußerst erfahrenen Mischmeister wie auch einen Betontechnologen für 3 Tage zur Ver-fügung.

Da der Wasser/Zement Wert einen zentralen Einfluss auf die Qualität der Fahrbahnbetone besitzt, wurden umfassende Untersuchungen zur Verbesserung der Feuchtemessung durchgeführt, um eine zuverlässige Dosierung der festen und fluiden Ausgangsstoffe in der IWB-Technikumsanlage sicherstellen zu können. Die vollständige Dosierung ist Voraussetzung, um eine gezielte Mischprozessführung durchführen zu können. Dabei zeigten sich folgende Erfordernisse, deren Umsetzung Gegenstand der weiteren Arbeiten war, um die Qualität der Feuchteaussteuerung und damit die Prozesssicherheit der Frischbetonherstellung zu gewähren:

- Einbauort des Sensors (Prallblech direkt, Prallblech indirekt, Bunkereinbau, Schlitten...)
- Dosierzeit lange genug
- Kontinuierlicher Dosierstrom

- Verschmutzungsgrad des Sensors
- Probenahme bei Inbetriebnahme
- Hardwarefehler
- Software zur einfachen Bedienung, Justierung, Kalibrierung, Visualisierung, Fehlerbehebung, ' Datenbankfunktionen, ...

Die vorgenannten Maßnahmen wurden im Jahr 2020 umgesetzt und deren Wirkung auf die Frischbetonherstellung systematisch analysiert und optimiert. Die sich als ideal geeignet erweisenden Sensorkonfigurationen mussten letztlich noch in der (teil-)automatisierten Steuerung und Regelung der Mischanlage implementiert werden.

Von nun an konnten die Mischversuchsreihen planmäßig durchgeführt werden.

6.1.5.2 Vorbereitung der Halle des Mischtechnikums zur Installation und zum Betrieb der Liebherr-Mischanlage

Um die Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage im Technikum des IWB an der Universität Stuttgart aufstellen zu können, mussten umfassende und ursprünglich nicht vorhersehbare bauliche und anlagentechnische Maßnahmen vorgenommen werden. Um die erheblichen Lasten aus Eigengewicht und dynamischen Beanspruchungen des laufenden Betriebs der Mischanlage in der Technikumshalle aufnehmen zu können, mussten erhebliche bauliche Ertüchtigungen in den unterhalb der Aufstellfläche befindlichen Kellerbereichen vorgenommen werden. So mussten Fundamente verstärkt sowie Stützen und Unterzüge ergänzend eingezogen werden, um die Hallendecke statisch-konstruktiv in der erforderlichen Weise zu ertüchtigen. Desweiterem mussten komplizierte Durchbrüche in der Hallenaußenwand vorgenommen werden, um den Beschicker der Mischanlage zwischen den außenliegenden Taschensilos und der in der Halle befindlichen Mischanlage führen zu können. Umfassende Rohbauarbeiten nahmen auch die außenseitige Aufstellung der Taschensilos wie auch des Zementsilos ein. Hierbei musste während der Baumaßnahmen festgestellt werden, dass die Silos unmittelbar an die alten unterirdischen Gesteinskornsilos angrenzen. Die unterirdischen Außensilos wurden bereits vor mehr als 20 Jahren stellgelegt und das damals hier befindliche Mischlabor wurde in eine andere Halle verlegt.

Wie eingangs aufgezeigt, erforderte die Aufstellung der Liebherr Mischanlage umfassende bauliche Ertüchtigungsmaßnahmen. Schließlich bedurfte der Einbau des Gestells des Mischers in der teilweise unterkellerten Halle einer statisch-konstruktiven Überprüfung, die von der für die Universitätsbauten zuständigen Bauverwaltung, der Staatlichen Vermögen und Bau Baden-Württemberg, einem Tragwerksplaner übertragen wurde. Die statischen Untersuchungen führten zum Ergebnis, dass die Deckenkonstruktion der Versuchshalle umfassend ertüchtigt werden muss. So musste zur Verstärkung der Decke eine Ersatzkonstruktion im Kellergeschoss unter dem Deckenboden eingebaut werden. Die Ersatzkonstruktion aus Stützen und Unterzügen in Stahlbauweise musste zudem aufwändig unter der Kellerbodenplatte gegründet werden. Darüber hinaus musste das im Freien an der Halle aufgestellte Gesteinskornreihensilo wie auch das Zweikammer-Zementsilo mit entsprechenden Fundamenten versehen werden. Zur Beschickung der Mischanlage bedurfte es zudem mehrerer größerer Wanddurchbrüche, um die in der Halle aufzustellende Mischanlage mit dem Gesteinskornsilo und der Dosieranlage zu verbinden. Ferner musste zur Aufbereitung des bei der Betonherstellung anfallenden Abwassers und zu dessen Einleitung in die öffentliche Kanalisation eine Abwasserreinigungsanlage in der Versuchshalle installiert werden. Diese umfasst die Reinigung der zementhaltigen Abwässer. Bevor die Abwasserreinigungsanlage installiert werden konnte, mussten im Keller zwei große Auffangwannen in WU-Bauweise errichtet werden. Die Abwasserreinigungsanlage wurde von Ecofrog beschafft und in deren Verantwortung auch

erstellt. Entsprechend der Genehmigungsauflagen der Stadt Stuttgart zu erfüllen, musste an die Abwasserreinigungsanlage folgende Aufgaben erfüllen: Waschwasser mehrerer Beton-Labormischer reinigen und neutralisieren

- Sand- und Kiesreste automatisch auswaschen und grobe Gesteinskörnung abtrennen, max. Korngröße ca. 20mm
- Zementleimsuspensionen sind in einem Schmutzwasserbehälter zu puffern
- Feinanteile des Restwasser mittels (hydraulischer) Filterpresse verarbeiten, um trockene Filterkuchen zu realisieren
- Filtrat muss zur Vorreinigung von Mischern verwendet werden können
- Filtrat ist zur Neutralisation ebenfalls in einem Behälter gepuffert werden
- Klares Restwasser ist durch CO2 außerhalb der Halle zu neutralisieren (pH-Wert zwischen 12 und 13)
- Lagerschrank der CO2-Gasflaschen sind außerhalb aufzustellen
- Maximaler Volumenstrom Schmutzwasser ca. 1m³/h, Tagesleistung max. 10h
- Betrieb der Anlage und der Filterpresse muss durch wissenschaftliche MitarbeiterInnen geleistet werden können
- Sicherstellung der Einhaltung der örtlichen Abwassergrenzwerten und Dokumentation der Abwasserqualität muss im laufenden Betrieb erfolgen können

Um die zu installierenden Anlagenkomponenten mit entsprechender elektrischen Anschlussleistungen versorgen zu können, war es unerlässlich, eine komplett neue Elektroinstallation im Bereich der Schwach- und Starkstromversorgung in der Versuchshalle vorzunehmen. Hierzu wurde ein Elektrofachplanungsbüro beauftragt, die entsprechenden Ingenieurplanungen und die Ausschreibung vorzubereiten. Bereits im Erläuterungsbericht der Elektroplaner wurde ausgeführt, dass die gesamte Elektroinstallation einschließlich der Hallenbeleuchtung zu erneuern ist, um die künftige Nutzung der Halle als Mischtechnikum überhaupt ermöglichen zu können.

So wurde eine Anschlussleistung unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren in Höhe von 450 kVA als notwendig erachtet, um sowohl die Doppelwellenmischanlage als auch die Abwasserreinigungsanlage mit den benötigten elektrischen Leistungsanforderungen versorgen zu können. Die Elektroinstallationen Starkund Schwachstrom (EDV-Netz) in der Halle waren komplett zu erneuern einschl. der Bereichsverteilung und der Allgemein- und Sicherheitsbeleuchtung. Dabei wurde die neue Bereichsverteilung für die erforderlichen Anschlüsse der neuen Liebherr-Betonmischanlage.

Um die Stromversorgung direkt aus der 200 m entfernten Trafostation Pfaffenwaldring 4 (Baubereich der MPA Universität Stuttgart und IWB) versorgen zu können, bedurfte es eines neuen Trafos sowie einer Neuverlegung der Kabel. Die Kabelverlegung erforderte neu zu montierende Kabeltrassen. Für die ersten hundert Meter konnte aber ein bestehender Kabelgraben genutzt werden. Das EDV-Netz der Technikumshalle wurde mittels LWL-Kabel an das vorhandene EDV-Netz angeschlossen.

Die Vorbereitung der Vergabe und auch die Planung der Elektroinstallationen erforderte von Beginn an eine enge Abstimmung zwischen den Forschungspartnern Liebherr und IWB wie auch die Einbindung der zuständigen Bauverwaltung (Vermögen- und Bau Baden-Württemberg), des Dezernats Bau der Universität Stuttgart nebst den beteiligten Fachplanern und Genehmigungsbehörden (Umweltamt der Landeshauptstadt Stuttgart). Die Elektroinstallationen konnten im ersten Quartal 2019 weitestgehend abgeschlossen werden, obgleich in Anbetracht des Projektverlaufs des Verbundvorhabens im Zuge des Austauschs des Antriebsstrangs der Liebherr-Mischanlage immer wieder Anpassungen in den Schaltschränken und der Verlegung und Zuführung der Stromversorgungskabel durch die ausführende Unternehmung Siemens vorgenommen werden mussten. Zwar wurde seitens der Elektroinstallation eine erste Inbetriebnahme der Betonmischanlage zu dem im Februar 2019 in Stuttgart veranstalteten "3. Forschungskolloquium Betonstraßenbau" ermöglicht, um anlässlich der Praxisvorführungen erste Betonmischungen herzustellen, doch musste infolge der noch nicht vollständig betriebsbereiten und infolge des noch nicht vom Umweltamt der Stadt Stuttgart freigegebenen Betriebs der Abwasserreinigungsanlage der Betrieb der Mischanlage wieder eingestellt werden.

Auch wenn die Abwasserreinigungsanlage noch nicht freigegeben wurde, so wurde eine erste Inbetriebnahme und Einweisung durch die Fa. Liebherr im Herbst 2019 vorgenommen. Die erheblichen Einschränkungen der nach dem Jahreswechsel 2019/20 im 2. Quartal 2020 vorherrschenden Pandemie führten zu weiteren ungeplanten Verzögerungen, um die Abwasserreinigungsanlage durch Ecofrog in den vollständigen Betrieb zu führen, was aber Voraussetzung war, um seitens der Stadt Stuttgart eine Betriebsgenehmigung zu erhalten. Auch wenn zunächst bis zum Juni 2020 Zutrittsbegrenzungen auf dem CampUS seitens der Universitätsleitung ausgesprochen wurden, so war es vor allem die Personalkapazitätsprobleme bei Ecofrog, weshalb erst im Oktober/November 2020 die Abwasserreinigungsanlage erst im Sommer 2021 erteilt wurde, so wurde mit Blick auf den ehedem stark verzögerten Projektverlauf die Mischanlage seit dem 3. Quartal genutzt, um das im Vorhaben vorgesehene Versuchsprogramm starten zu können.

6.1.5.3 Installation der Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage

Mit der Bewilligung des Verbundvorhabens "Betonfahrbahn 4.0" wurde in der ersten Projektphase mit den Partnern Liebherr und Cavex umfassende Abstimmungsgespräche geführt, um für die im Technikum des IWB zu installierende Mischanlage alle an die projekt-, bau- und anlagenspezifischen Besonderheiten zusammenzuführen und eine für die erfolgreiche Umsetzung der Forschungsziele geeignete Anlagenkonfiguration zu schaffen. Letztlich wurde seitens der Fa. Liebherr folgende Anlagenkonfiguration im Juli 2017 angeboten, die nach der Beauftragung durch die Universität im November 2017 werkseitig gefertigt und im Oktober 2018 an die Universität Stuttgart ausgeliefert wurde.

Folgende Leistungsmerkmale kennzeichnen die für das Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" beschaffte Betonmischanlage **Kombimix 1,25 A-R/DW**, 400 V / 50 Hz:

- Mischer: Doppelwellenmischer DW 1.25
- Antriebsstrang: 45 kW, 2 Planetengetriebe
- Mischereinbauteile
- Mischerabluftfilter
- Betonabgabe: Auslauftrichter mit Gummirüssel
- Mischerbühne: Stützkonstruktion nebst Aufstiegsleiter sowie Aufstieg zur Waagenbühne
 - Beschickung: Beschickeraufzug
- Wägeeinrichtungen: Zementwaage, Dosiermittelwaagen, Wasserwaage für Rein- und Restwasser
- Druckluftsystem

•

- Elektrische Verteilerschränke
- Zementsilo, -schnecken: 30 t (24 m³)

- Reihensilo und Wiegeband:
- 4 Taschen a 17,5 m³ insgesamt 70 m³, 8 Einfachverschlüsse, Rüttler, Feuchtesonde für Kornfeuchtebestimmung, Höchstlast 3.500 kg

Die Doppelwellenmischanlage wurde im Oktober 2018 im Technikum der Universität Stuttgart installiert, nachdem die baulichen Umbaumaßnahmen und auch die elektrischen Installationen soweit abgeschlossen waren, dass die Aufstellung der Mischanlage möglich war.

Einen Eindruck über die Abläufe zur Installation der Mischanlage geben die nachfolgenden Fotoaufnahmen in Abbildung 6.80.



Abbildung 6-80: Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB

Um bereits eine eingehende Analyse der Mischprozesse bei der Herstellung von Fahrbahnbetonen mit dem üblichen Mischregime wie auch mit dem in der Standardausführung der Doppelwellen-Mischanlage zur Ausführung kommenden Antriebsstrang vornehmen zu können, wurde mit der Fa. Liebherr vereinbart, den Antriebsmotor durch einen Motor auszutauschen, der zwar die gleiche Leistungsstärke aufweist, der aber die Möglichkeit einer aktiven Kühlung und den Anschluss eines TAM-Sensors ermöglicht. Der Umbau erfolgte im Frühjahr 2020. Damit sollte der Mischer auch in der Standardausführung für die bevorstehenden Versuche in

die Lage versetzt werden, eine elektronische Leistungseintragsvermessung sowie eine Analyse der Drehbewegung der Mischwellen mittels der im elektrischen Schaltschrank von Siemens verbauten Frequenzumrichtereinheiten der Fa. ABB vornehmen zu können, obgleich die Frequenzumrichter erst zu einem späteren Zeitpunkt, nämlich nach dem in der zweiten Phase, dem geplanten Austausch des Antriebsstranges mit CAVEX-Schwerlastgetriebesatz und deutlich leistungsstärkerem Synchronmotor mit 75 kW sowie den neuen CAVEX-Getriebesätzen, zum Einsatz kommen sollte.

Mit dem zuvor beschriebenen Austausch des 45 kW Antriebsmotors sowie mit der Ansteuerung des Antriebsmotors über den Frequenzumrichter ist es nunmehr möglich gewesen, bereits während des Mischbetriebs die in den Frischbeton eingetragene Mischenergie und dies sich im Laufe des Mischprozesses einstellenden Mischwerkzeuggeschwindigkeiten messtechnisch exakt zu erfassen. Zudem wurde seitens der Fa. Liebherr das ursprüngliche Steuerungssystem der Standard Liebherr Mischanlage durch eine modernere höherwertige und leistungsfähigere Steuerung ersetzt und die erforderlichen Ankopplungen der Motorleistungsanschlüsse an die Frequenzumrichter von ABB vorgenommen. Mit diesem Umbau und der Implementierung der neuen Steuerung konnten nunmehr die Versuchsreihen zum Einfluss des Mischenergieeintrags auf die Frischbetonkonsistenz angegangen werden. Die Inbetriebnahme der angepassten Mischanlage erfolgte im September 2020. Die Mitarbeiter des IWB wurden über drei Tage hinweg in die Handhabe, den Betrieb und die Pflege und Wartung der Mischanlage eingewiesen. Herzu stellte Liebherr einen erfahrenen Mischmeister und Mechaniker bereit. Ergänzend erklärte sich auch die Fa. Schnorpfeil bereit, für den Zeitraum der Einweisung einen äußerst erfahrenen Mischmeister sowie einen Betontechnologen für die 3-tägige Einweisung und Erprobung nach Stuttgart zu entsenden, um "learning by doing" unter Anleitung von erfahrenen Profis nicht nur den Mischbetrieb und die Reinigung wie auch die erforderlichen Wartungen kennenzulernen, sondern auch die Durchführung betontechnologischer Frischbetonprüfungen in Verbindung mit den vielfältigen Informationen, die sich der Echtzeitsteuerung aber auch den audiovisuellen Wahrnehmungen ableiten lassen.

Anlässlich der dreitägigen Einführung konnte mit dem technischen Service der Liebherr Mischtechnik in Bad Schussenried einige noch vorhandene Probleme angegangen und gelöst werden. Zudem mussten einige Ventile und Pumpen infolge der einjährigen Dauer des anlagenstillstands seit 2019 wieder der Funktionsfähigkeit zugeführt werden. Einzelne Ersatzteile mussten nochmals nachbestellt werden, so dass zum Oktober 2020 mit der Freigabe des Betriebs der Abwasserreinigungsanlage die Mischversuche zur Charakterisierung des Mischverhaltens der Fahrbahnbetone in der Standardausführung endlich möglich wurden.

6.1.5.4 Integration von Feuchtemesssensorik in der Technikums-Mischanlage

Bei der Herstellung und beim Einbau von Fahrbahnbetonen kommt der zuverlässigen Einhaltung des geforderten Wasser-Zementwerts eine große Bedeutung zu, um eine gleichförmige Konsistenz der frischen Fahrbahnbetone über große Betoneinbaumengen hinweg sicherstellen zu können. Schließlich ändern sich über den zeitlichen Verlauf der Baumaßnahmen oftmals die Witterungsverhältnisse, so dass die Gesteinskornfraktionen im Falle intensiver Niederschläge feuchter sind als bei trockener Witterung. Auch variieren die Feuchtegehalte der mittels Sattelzügen auf den Halden abgeladenen Gesteinskornfraktionen. Infolge der immens großen Stoffumsätze beim Betonfahrbahnbau ist eine gezielte Feuchtekonditionierung der Gesteinskörnung durch Trocknung oder auch eine stete Abdeckung der Reihensilos nicht realisierbar. Letzteres scheidet aus, da große Radlader die Gesteinskörnung unmittelbar auf den Halden aufnehmen und direkt die Silotaschen befüllen. Die Materialentnahme erfolgt dabei so rasch, dass die i.d.R. 17 m³ fassende Silotasche nach wenigen Minuten nachbefüllt werden muss, so dass eine Siloabdeckung im baupraktischen Betrieb hinderlich wäre. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden am IWB umfassende Untersuchungen zur Verbesserung der Feuchtemessung durchgeführt, um eine zuverlässige Dosierung der festen und fluiden Ausgangsstoffe in der IWB-Technikumsanlage sicherstellen zu können. Eine vollständige Dosierung ist Voraussetzung, um eine gleichförmige und zielsichere Mischprozessführung zu realisieren. In den durchgeführten Untersuchungen zeigten sich folgende Erfordernisse, um die Qualität der Feuchtemessung und damit die Prozesssicherheit der Frischbetonherstellung zu gewähren:

- Richtiger Einbauort des Sensors (Prallblech direkt, Prallblech indirekt, Bunkereinbau, Schlitten...)
- Ausreichende Dosierzeit
- Kontinuierlicher Dosierstrom
- Berücksichtigung des Verschmutzungsgrads des Sensors
- Probenahme bei Inbetriebnahme und Feuchtebestimmung mittels Darren
- Abschätzung bzw. Berücksichtigung von Hardwarefehlern
- Software zur einfachen Bedienung, Justierung, Kalibrierung, Visualisierung, Fehlerbehebung, Datenbankfunktionen, ...

Die vorgenannten Maßnahmen zur Optimierung der Feuchterfassung wurden im Jahr 2020 umgesetzt und deren Wirkung auf die Frischbetonherstellung systematisch analysiert und teilweise optimiert. Die sich als ideal geeignet erweisenden Sensorkonfiguration muss aber letztlich in den in 2021 laufenden Untersuchungen im (teil-)automatisierten Betrieb identifiziert und in die Steuerung und Regelung des Mischbetriebs integriert werden.

Um die Feuchtebestimmung der Gesteinskörnungen am Siloauslass zu verbessern und um auch im Mischer Feuchtesonden zu integrieren, wurden ursprünglich nicht vorgesehene Einbauteile beschafft und Änderungen bzw. Anpassungen vorgenommen werden. So wurden die Feuchtesonden an den Siloauslässen wie auch im Innern des Mischsystemaufbaus angeordnet. Aufgrund Corona-bedingter deutlich längerer Lieferzeiten etc. kam es zu zeitlichen Verzögerungen. Entsprechend war hier ein weiterer Grund dafür, dass die für den ursprünglich geplanten Projektverlauf erforderliche Inbetriebnahme der Mischanlage nicht wie ursprünglich im Jahr 2019 erfolgen, sondern war erst im September/Oktober 2020 möglich.

Auch wenn die Mischersonde bislang nicht seitens der Fa. Liebherr in der Steuerung implementiert werden konnte, so konnten seit Oktober 2020 aber die angedachten Mischversuchsreihen durchführen, mit denen das Mischregime wie auch die daraus resultierenden Frischbetone charakterisiert werden sollte.

Durchführung der Mischreihen mit Standartantriebsstrang

Entsprechend der Überlegungen der Antragstellung sollten im Forschungsvorhaben insgesamt 256 Mischversuche durchgeführt werden, wie sie in Abbildung 6.81 aufgezeigt sind.

Versuchsart	Anzahl Versuche	Inhalt
Inbetriebnahme der Anlage (Mischung aus Literatur)	20	Funktionsprüfungen der Mischanlage (Zusammenarbeit Einzelkomponenten)
Abgleich Feuchtemessung (Mischung aus Literatur)	20	Abgleich Liebherr-Sonde/ Imko-Sonde / Darrversuch bei unterschiedlich feuchten Zuschlägen und Mischdauer
Mischungsentwicklung Zement I + FM I + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement I + FM II + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement I + FM III + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement I + FM I + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement I + FM II + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement I + FM III + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM I + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM II + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM III + LP-Bildner I	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM I + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM II + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung Zement II + FM III + LP-Bildner II	8	Mischungsentwicklung mit 2 Wassergehalten und 4 Mischzeiten
Mischungsentwicklung alternativer Zusatzstoff Flugasche	10	Auf Basis der Erkenntnisse aus den bis dahin durchgeführten Versuchen mit der besten Kombination Zusatzmittel
Mischungsentwicklung alternativer Zusatzstoff Metakaolin	10	Auf Basis der Erkenntnisse aus den bis dahin durchgeführten Versuchen mit der besten Kombination Zusatzmittel
Mischungsentwicklung alternative Zusatzstoff Silika	10	Auf Basis der Erkenntnisse aus den bis dahin durchgeführten Versuchen mit der besten Kombination Zusatzmittel
Erfassung der Frischbetoneigenschaften über Mischer	10	Vorversuche bei niedrigsten Drehzahlen bzw. Drehmomenten. Frischbeton ist nicht nutzbar für Untersuchungen
Mischer als Rheometer (drehzahlgeführt) Asynchronmotor	10	Standardmotor zur Messung der Frischbetoneigenschaften über Drehzahl
Mischer als Rheometer (drehmomentgeführt) Asynchronmotor	10	Standardmotor zur Messung der Frischbetoneigenschaften über Drehmoment
Mischer als Rheometer (drehzahlgeführt) Synchronmotor	10	Performance-Antrieb zur Messung über Drehzahl
Mischer als Rheometer (drehmomentgeführt) Synchronmotor	10	Performance-Antrieb zur Messung über Drehmoment
5 Einzelchargen hintereinander (Mischung Literatur)	10	2 x (um Realität abzubilden / Dauerbetrieb)
5 Einzelchargen hintereinander (Mischungsoptimierung Zement I)	10	2 x (um Realität abzubilden / Dauerbetrieb)
5 Einzelchargen hintereinander (Mischungsoptimierung Zement II)	10	2 x (um Realität abzubilden / Dauerbetrieb)
5 Einzelchargen hintereinander (alternative Zusatzstoffe)	10	2 x (um Realität abzubilden / Dauerbetrieb)
Summe	256	256 Versuche * 1.25 Kubikmeter!

Abbildung 6-81: Zusammenstellung der insgesamt 256 Mischversuche, die im Rahmen der Projektbearbeitung im IWB-Technikum mit der Liebherr DW 1,25 durchzuführen waren

Für die Mischungen am IWB wurden die in der Zusammenstellung in Abbildung 82 aufgezeigten Materialmengen benötigt. So wurden mehr als 300 Tonnen Gesteinskörnung und 40 Tonnen Zement beschafft und mit der Technikumsmischanlage verarbeitet.

Materialverbrauch	
Gesteinskörnung	Menge [t]
0/2	82,5
2/8	86
8/16	58
16/22	87
Zement	
CEM I	18,5
CEM III	29

Abbildung 6-82: Materialverbrauch zur Durchführung der in Abbildung 69 aufgezeigten 256 Mischversuche

Die für die Betonage notwendigen Gestein Körnungen wurden an das IWB in Big-Packs geleifert mit Sattelzügen geliefert. In Abbildung 6.82 werden die Materialmengen der ersten Lieferung deutlich. Alle angelieferten Materialmengen müssen vom Lieferfahrzeug entladen und bis zur Aufnahme in die Taschensilos im Umfeld des Mischtechnikums gelagert werden.

Sind die Taschensilos zu befüllen, müssen die Gesteinskornfraktionen zunächst vom Lagerplatz zum Taschensilo geführt werden. Die Beschickung der Taschensilos erfolgt über ein Förderband. Die in Big-Packs angelieferten Gesteinskörnungen mussten zunächst mit dem Elektrostapler vom Lagerplatz (Abbildung 6.82) bis zum Förderband geführt werden und hier über dem Aufnahmetrichter aus dem Big-Pack entleert werden. Der gesamte Prozess erwies sich als extrem zeitaufwendig und zudem konnten die Big-Packs nicht so genau entleert werden, so dass ein erheblicher Mehraufwand für die spätere Reinigung der Verkehrsflächen nach jedem Beschicken der Taschensilos notwendig wurde. Um den Prozess zu vereinfachen, wurden bei den folgenden Gesteinskornbestellungen nur noch Schüttgut-Bestellungen vorgenommen. Die angelieferten Kornfraktionen wurden dann in entsprechend vorbereitete Lagerboxen vom Spediteur entladen (vgl. Abbildung 6.83). Mit der Einrichtung der U-förmigen Schüttgutsilos konnten die Gesteinskörnungen mit verringertem Aufwand bestellt, gelagert und mittels einer Schaufel, die wie in Abbildung 6.84 gezeigt am Stapler aufgenommen werden kann, gut dem Förderband übergeben werden, von wo aus das Gesteinskorn der Taschensilobox zugeführt wird.



Abbildung 6-83: Anlieferung der Gesteinskörnung in Big-Packs und Lagerung der Big-Packs im Umfeld der Technikumsmischanlagei



Abbildung 6-85: Lagerung der Gesteinskörnung in Schüttguthalden



Abbildung 6-84: Transport des Schüttgutes in der Schaufel mit dem Elektrostapler bis zum Förderband und Übergabe der Gesteinskörnung



Abbildung 6-86: Befüllung des Aufnahmetrichters des Förderbands zur Beschickung der Taschensilos mit einem Big-Pack

Insgesamt wurden im Rahmen der Vorhabenbearbeitung im Projektbearbeitungszeitraum über 311 Mischungen im Automatikmodus hergestellt und vom Leitrechner der Mischanlage protokolliert. Hiervon sind 15 "O-Chargen", bei denen die Einstellung und der Betrieb der Anlage zunächst auf den Mischprozessablauf hin überprüft und erprobt werden muss. D.h. bei diesen Mischungen wird kein realer Beton gemischt.

Die Anlage zeichnet lediglich die Mischungen auf, welche im Automatik Betrieb begonnen und ohne händischen Eingriff zu Ende geführt wurden.

Da mit dem IWB-MSR-Rechner auf die Daten des Leitrechners der Liebherr-Mischanlage zugegriffen werden sollte, um die rheologische Mischprozessführung zu realisieren, musste ein direkter Zugriff eingerichtet, getestet und erprobt werden. Bei der Schaffung dieser Schnittstelle gab es aber über einige Monate hinweg Probleme.

Datum: 01.02.2020 bis: 23.11.2021								
LS-Nr	Chp-Nr	Prod-Datum	Prod-Zeit	Sorten-Nr				
311	25235	23.11.2021	11:09	2_1				
310	25234	15.11.2021	11:06	2_1				
309	25233	15.11.2021	09:44	2_1				
308	25232	15.11.2021	09:32	2_1				
307	25231	10.11.2021	13:34	731111				

Chargenprotokolle

Werk¹

Abbildung 6-87: Ausschnitt aus dem Chargenprotokoll

Daher musste ein großer Teil der durchgeführten Mischungen zunächst im Automatikbetrieb, also im Standardbetrieb der Mischanlage durchgeführt werden. Erst nach der Beschickung des Mischers konnte dann in den Handbetrieb übergegangen werden, um mit dem IWB-MSR-Rechner die Betriebsführung zu übernehmen. Für diesen Switch zum Handbetrieb gibt es aber dann keine Aufzeichnung der Messreihen mit der Liebherr-Mischanlage.

Seitens des IWB musste daher zunächst erst einmal eine entsprechende Datenerfassungsroutine entwickelt und softwaretechnisch umgesetzt werden, die auch eine echtzeitfähige Auswertung der aufgezeichneten Daten erlaubt.

Abbildung 6-87 zeigt einen Ausschnitt des Chargenprotokolls der IWB-Technikumanlage.

Ferner wurde der gemischte Frischbeton nach dessen messtechnischer Bewertung in großformatige Legostein-Schalungen eingefüllt und verdichtet, die nach deren Erhärtung genutzt werden konnten, um die in Abbildung 73 gezeigten U-förmigen Lagerfreiflächen zu schaffen. Abbildung 76 zeigt derartige Betonblöcke, die mit dem Stapler aufgenommen und transportiert werden können. Da in den Versuchsreihen Betone mit den unterschiedlichsten w/z-Werte hergestellt wurden, ließen sich gerade die besonders steifen Frischbetone nicht mit der nötigen Qualität verdichten, so dass sich nicht alle Betonblöcke verwenden lassen, sondern dann fachgerecht zu entsorgen sind.

Da das IWB mit den Fördermitteln nur sechs Betonblockschalungen beschaffen konnte, von denen jeder einzelne Betonblock ein Volumen von ca. 0,45 m³ aufweist, musste mit Blick auf die Kürze der für die Versuchsbearbeitung noch verfügbaren Laufzeit die hergestellten Frischbetone in Big-Packs gefüllt und diese über Mulden entsorgt werden. Daher musste nach der Befüllung aller Schalungen der fertig gemischte Frischbeton in Big-Packs abgefüllt werden.



Abbildung 6-88: Transport der Betonblöcke mit dem Elektrostapler zum Betonsteinblocklager

Die Big-Packs wurden ebenfalls als Abgrenzungsbauteile für die Schüttgutsilos verwendet, wie in Abbildung 6.88 (rechts) verdeutlicht. Durch das Befüllen des Frischbetons in die Big-Packs wurde ein hoher Durchsatz an Mischungsversuchen ermöglicht. Die Gesamtzahl der Mischungen ging weit über die im Antrag beschriebene Versuchsanzahl hinaus.

Integration flexibler Schnittstellen in der Technikums Anlage der Universität Stuttgart

Die Herstellung von Fahrbahnbetonen im technikumsmaßstäblichen Umfang erfordert die Anpassung der Schnittstellen zur Technikumsanlage, um einen flexiblen Zugriff auf interne Daten der Steuerung zu Überwachungszwecken zu ermöglichen. Neben diesen Zugriffen mussten die Projektpartner in die Lage versetzt werden, ohne Eingriffe auf der Code-Ebene eigene Funktionen zur Ansteuerung und Auswertung der Drehmomente bzw. Leistungsprofile während des Mischprozesses innerhalb von Rapid-Development Systemen zu entwickeln. Hierzu wurde die Liebherr-Steuerung (LWS4) um eine OPC-UA Schnittstelle erweitert (Abbildung 6-45). Anhand dieser standarisierten Schnittstelle ist das IWB in der Lage, alle steuerungsrelevanten Variablen des LWS4 auszulesen. Neben den Variablen der existierenden Steuerung besteht so auch die Möglichkeit, das existierende System um zusätzliche analoge oder digitale Sensorik zu erweitern. So können bspw. alternative Feuchtesensoren oder Drehmomentsensoren eingebunden werden.

Zur Ansteuerung des Frequenzumrichters der Firma ABB wurde eine Schnittstelle auf OPC-UA-Basis entwickelt. Diese erlaubt den Betrieb des FU in unterschiedlichen Betriebsmodi:

- **Standard-Betrieb**: Die Steuerung des Frequenzumrichters entspricht der "normalen" Ansteuerung. Der Mischermotor wird mit einer konstanten Drehzahl angesteuert. Die Prozessdaten (Motorgeschwindigkeit, Drehmoment, Ströme in den einzelnen Phasen, Wirkleistung) des Antriebes können ausgelesen und überwacht werden
- **Geschwindigkeitsgeregelter-Modus**: Die Prozesssteuerung erzeugt keinen Sollwert für die Mischerdrehzahl, dieser wird alternativ über OPC-UA aus einem Rapid-Prototyping System generiert. Es ist somit möglich, unterschiedliche Geschwindigkeiten für die Ansteuerung des Motors vorzugeben.
- Drehzahlgeregelter-Modus: Von der externen Schnittstelle werden Sollwerte zur Ansteuerung des Antriebes im Drehmomentbetrieb gesendet. Hierbei kann ein Solldrehmoment eingestellt werden und dieses wird von der FU-Steuerung mittels eines durch ABB parametrierten P-Reglers umgesetzt. Die Rückführung von Ist-Moment und Ist-Geschwindigkeit erlaubt nun die Implementierung eigener Regelungsstrategien im Drehzahl- und/oder Konsistenzregelkreis.

Bevor mit der Durchführung der Versuchsreihen zur Analyse der Frischbetonherstellung mit der Technikumsanlage Liebherr DW1.25 begonnen wurde, konnte mit der Fa. Liebherr vereinbart werden, den standardmäßig verbauten Elektromotor mit einer Leistung von 45 kW (asynchron) durch einen baugleichen aber mit einer längeren motorabgängigen Welle auszutauschen, der dann direkt mit dem Frequenzumrichter von ABB betrieben werden sollte. Zudem konnte die längere Motorwelle genutzt werden, um einen Drehgeber zu adaptieren. Mit dem ergänzten Drehgeber ist es möglich, den Mischprozess bereits mit der Standardsteuerung und dem Standardabtrieb eingehend messtechnisch zu analysieren. Über die beantragte Vorgehensweise hinaus kann so ein direkter Vergleich der Leistungsaufnahme des Betons während des Mischverlaufs bereits mit der Standardanlage vorgenommen werden. Des erlaubt eine spätere Wiederholung der Mischversuche mit dem neuen verlustarmen CAVEX-Antriebsstrang und sollte erlauben, bereits allein für das standardmäßige Mischregime der Liebherr-Mischprozessführung die Unterschiede der Antriebsstränge (Asynchron-Elektromotor ohne FU und Keilriemen versus Synchron-Elektromotor mit FU und CAVEX-Planetengetriebe) auf den Mischverlauf herausarbeiten zu können.

Im Frühjahr 2020 wurde der Austausch des Asynchron-Elektromotors vorgenommen und die Verbindung und Ansteuerung der Liebherr-Steuerung mit dem ABB Frequenzumrichters hergestellt und in Betrieb genommen.

Somit konnten von Oktober 2020 an die planmäßigen mit der Standardausführung vorgesehenen Mischversuchsreihen mit der standardmäßigen und nachträglich mit dem FU und dem Drehgeber ausgerüsteten Liebherr Doppelwellenmischanlage aufgenommen werden. Dank der FU-ankopplung können über die ehedem mit der Liebherr -Steuerung aufnehmbaren Betriebsdaten der Mischanlage auch alle für eine Bewertung des Mischverlaufs relevanten Daten wie Drehnennmoment, Drehzahl (aus FU und über externen Drehgeber), Motorleistung etc. erfasst werden. Zudem konnte ein externer Zugriff auf die Mischprozessführung über OPC-UA realisiert werden, so dass bereits vor dem planmäßigen erneuten Umbau des Antriebsstrangs erste Programmierungen zur rheologiegestützten Mischprozessführung entwickelt und, soweit mit einem Asynchron-Motor möglich, erprobt werden.

Nach Durchführung der mit dem Standardantrieb vorgesehenen Mischversuche konnte im März/April 2021 der Umbau des Antriebsstrangs erfolgen. Hierzu wurde der standardmäßige Antriebsstrang mit Liebherr Getriebesatz und dem asynchronen Antriebsmotor mit 45 kW durch das neue im Rahmen des Verbundvorhabens von CAVEX entwickelte Planetengetriebe und einen deutlich leistungsstärkeren Synchron-Elektromotor mit 75 kW Leistung ausgetauscht. Mit dieser neuen Antriebseinheit und der FU-geregelten Betriebsweise des Mischsystems, sollen im weiteren Verlauf des Vorhabens Betonfahrbahn 4.0 nun die feinstoffreichen und wasserarmen Betongemische der Fahrbahnbetone kontrolliert mit einem höheren Energieeintrag rheologiegestützt hergestellt werden. Dies sollte zu deutlich kürzeren Mischzeiten bei gleichzeitig vollständiger Homogenisierung des Frischbetongemisches führen, um einen Beton mit stets gleichbleibender Konsistenz und Verarbeitbarkeit bereitstellen zu können.

6.1.5.5 Inbetriebnahme und rheologiegestützte Mischprozessführung mit der Mischanlage am IWB

Konzeptansatz zur rheologiegestützten Mischprozessführung mit dem Standardantriebsstrang und FU-Regelung

Die konzeptionelle Idee des rheologiegeführten Mischprozesses erfordert in der Umsetzung einige Aspekte der Regelung elektrischer Antriebe zu berücksichtigen. Bei der Betrachtung solch komplexer Anlagensysteme müssen die funktionalen Einheiten des Gesamtsystems strukturell geordnet werden, um das Zusammenwirken, Dynamikverhalten sowie weitere Funktionen formalisiert werden. Zudem musste die Umsetzung der rheologiegestützten Mischprozessführung anhand der zuvor durchgeführten Untersuchungen erweitert werden.

Vorrangiges Ziel ist die Etablierung und Validierung der im Vorhaben erarbeiteten Methoden, Werkzeuge und Prozeduren zu erarbeiten. So muss es Ziel weiterer Vorhaben sein, Aussagen hinsichtlich der Mischqualität bereits im Verlauf des Mischens des Betons in der Mischanlage geben zu können, um bei Abweichungen z.B. der Zielkonsistenz über ein vertretbares Maß mit geeigneten Maßnahmen optimierend-regelnd einzugreifen. So könnte bei zu steifer Konsistenz die bedarfsgerechte Nachdosierung von z.B. Fließmittelangeordnet werden. Bei zu weichem Frischbeton kann die Konsistenzverbesserung durch Zugabe von z.B. Stabilisierer oder geeigneten Betonzusatzstoffen erfolgen.

Grundsätzlich handelt es sich also um eine klassische Regler-Beobachter-Aufgabe. Mit der Festlegung von zu erzielenden Gütekriterien wurde mit den Untersuchungen angestrebt, jegliche nutzbringende Informationen aus den Daten des Frequenzumrichters zur Charakteristik des Antriebsstrang während des Ablaufs von Mischprozessen zu gewinnen und soweit zielführend, zu interpretieren. Entscheidend war die Erreichung eines Arbeitsstandes, mit dem seitens der Steuerung, dem IWB-Rechnersystem, eine Zielvorgabe zum geforderten Drehmoment bzw. zur geforderten Drehzahl dem FU und damit dem Antriebsstrang zu übergeben und in quasi Echtzeit anhand der sich daraufhin entwickelnden Ist-Werte die Erreichung der Sollvorgabe zu erfassen. Weichen die Ist-Wert-Messungen von den Sollvorgaben über ein gefordertes Akzeptanzmaß hinaus ab, muss mit dem Regler schnellstmöglich die Anpassung erreicht werden. Zunächst wurden ausgewählte Regelstrategien seitens des IWB umgesetzt, die im Zuge weiterer Vorhaben im Kontext der Herstellung von Fahrbahnbetonen weiter verbessert und verfeinert werden sollen.

Ziel ist es, mit der Veränderung der Ist-Werte letztlich auch die geregelte Zuführung von konsistenzverbessernden Zusätzen durch angepasste Regelbewertungsstrategien umzusetzen, um neben den maschinentechnischen Möglichkeiten auch die rasche Verbesserung der Konsistenzerreichung durch eine stoffliche Anpassung zu ermöglichen. Die Integration von Regelanpassungen zum der stofflichen Auch wenn im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0 Damit szu erzielen und damit stets in ihren Frischbetoneigenschaften gleichförmige Betone von der Mischanlage an die Transportfahrzeuge zu übergeben.

Drehzahlgeführte Mischversuche - Analysen der Prozessdaten der Versuche mit Asynchron-Antrieb

Anfänglich wurde die Kernidee derart verfolgt, dass mittels einer Trajektorienvorgabe aus vorgegebenen Sollwerten der Regelgröße innerhalb definierter Zeitintervalle Belastungstests durchgeführt werden. Die resultierenden Zeitverläufe der Zustands- und Ausgangsgrößen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Rezeptur und des rezepturspezifischen Materialverhaltens hinsichtlich der Amplitude, Frequenz(en), Lastwechselgradienten, Einpendelungszeiten von Zustandsgrößen, die während des Mischens für den jeweils untersuchten Beton gewonnen werden. So konnten für die Verläufe der Leistungsdaten des Antriebs beispielsweise Einhüllende für die maximalen und minimalen Energieeinträge der Mischwerkzeuge der Verlauf von charakteristischen Einhüllenden spezifiziert werden, die eine Reihe von interessanten Interpretationen zur Charakterisierung des aktuellen Zustands des Frischbetons im Verlauf des Mischens bieten.

Zunächst beschränkten sich die ersten Wochen der Untersuchungsreihe auf die Analyse von drehzahlgeführten Mischregimen. Entsprechend wurden zunächst mehrere, hintereinander ausgeführte Mischphasen mit festgeschriebenen Zeitintervallen durchgeführt. Prinzipiell sollten bei vorgegebener Trajektorie des Mischprozesses überprüft werden, inwieweit sich bei mehrmaligem Durchlaufen einer jeweiligen Mischphase am Frischbeton merkliche Veränderungen infolge eines sich stets verbessernden Aufschluss aller Bestandteile einstellt oder durch eine Übermischung und einhergehende Erwärmung des Frischbetons gar ein gegenläufiger Effekt einstellt.

Die theoretischen Überlegungen wurden experimentell mit der Technikums-Mischanlage umgesetzt und erprobt. Dabei zeigte sich, dass als Bedingung einer Bewertung, ob eine hinreichende Mischgüte im bisherigen Mischprozess erzielt wurde, sich in einem drehzahlgeführten Regime nicht mit einer Bewertungsgröße "Drehzahl" herangezogen werden kann. Es ist unerlässlich, dass zur hinreichenden Bedingung für die Bewertung der Mischgüte zu prüfen bzw. die Zustandsgüte einer Mischung zu bewerten, müssen die Verläufe der übrigen Zustandsgrößen herangezogen werden. Schließlich bedarf es zur rheologiegestützten Mischprozessführung einer Identifikation der prozessrelevanten Zustandsgrößen, die in der Steuerungssystematik zur Verfügung stehen und die erlauben, dass mit der entsprechenden Datenanalyse eine Qualitätsbewertung der aktuellen Mischgüte des Betongemisches innerhalb des Mischsystems vorgenommen werden kann.

Das Einschwingen des Antriebstrangs auf eine konstante Drehzahl in einem drehzahlgeführten Misch-regime, sowohl im Falle eines homogen aufgeschlossenen als auch im Falle eines noch nicht vollständig homogenisierten Frischbetongemisch kann als Zielerreichung des Energieeintrags betrachtet werden. Zu untersuchen war aber, wie der Frequenzumrichter in idealer Weise den Antriebsstrang dahin führt, dass in einer kürzest möglichen Zeit die Sollvorgabe der Drehzahl erreicht und konstant gehalten werden kann. Grundsätzlich moduliert der Umrichter den Netzstrom entsprechend des Sollwerts der Regelgröße und führt diesen dann dem Stator zu. Folglich kann man davon ausgehen, dass die Zeitverläufe bestimmter Zustandsgrößen, so etwa des Stromes, sich im Falle einer ideal vorliegenden Mischgüte (Idealfall) qualitativ von jenen Verläufen unterscheiden, welche während eines aktiven Regelvorgangs, also während der noch nicht erreichten homogenen Vermischung des Gemisches, im Laufe des Mischprozesses den Prozess bestmöglich zur Zielerreichung führen.

Trotz Umsetzung und Erprobung der drehzahlgeführten Regelstrategien ist es im Bearbeitungszeitraum des Verbundvorhabens noch nicht gelungen, in eindeutiger Weise das Mischende festzustellen. Die Stabilisationszeit, also der Zeitpunkt, zu dem anhand der erfassten Prozessdaten eine Bewertung erlaubt, ob die gewünschte Mischgüte und damit das Ende der Mischzeit erreicht ist, kann noch nicht zielsicher benannt werden. Anhand der an Labormischern vorgenommen Untersuchungen konnte aber nachgewiesen werden, dass insbesondere für anspruchsvolle Betongemische, zu denen auch die Fahrbahnbetone zählen, der Leistungseintrag des Motors keine hinreichende Sicherheit bietet. Gerade die im Labor mit dem Einwellenmischer gesammelten Erkenntnisse, dass eine Homogenisierung des Fahrbahnbetons mehrere Minuten erfordert, unterstreicht diese Aussage.

Folglich wurden geeignete Filterverfahren gesucht, mit denen die große Zahl der unterschiedlichen Prozessdaten während des Mischens kontinuierlich erfasst, gespeichert, ausgewertet und in geeigneter Weise hinsichtlich des Zustands des Frischbetons während des Mischens in Echtzeit bewertet werden können. Entsprechende Bewertungsmethoden mussten herausgearbeitet werden, um mit smarten Auswerteroutinen die anfallenden Prozessdaten in einer online-basierten Nutzeroberfläche bewertet aufzeigen zu können. Am Beispiel von Frischbetonen mit unterschiedlichen w/z-Werten konnte in den Technikumsversuchen auf diese Weise ein gutes Regelverhalten des Gesamtsystems herausgearbeitet werden, mit dem es auch möglich wurde, das Erreichen des Mischendes einzuschätzen. Die eigentliche Bewertung der rheologischen Eigenschaften des Betongemisches erfolgt in einer folgenden 2. Mischphase. Hierzu wird die erste Mischphase beendet und der Antrieb auf die Drehzahl 0 U/min zum Stillstand geführt. Interessanter Weise erfährt der Antriebsstrang beim Bremsvorgang ein vom w/z-Wert abhängiges Bremsmoment infolge einer Dämpfung von unterschiedlich starker Ausprägung: $D_{0.47} > D_{0.45} > D_{0.43}$.

Es lassen sich mit dem Antriebsstrang die Verläufe aller nicht geregelten Größen, welche sich in Abhängigkeit der Drehzahlvorgabe in den jeweiligen Mischsequenzen einstellen erfassen und automatisiert bewerten. Beobachtbare Unterschiede lassen sich formalisieren, um so den verlaufscharakterisierenden Merkmalen der Prozessgrößen spezifische Werte zuordnen zu können. Gelingt es diese Größen vergleichend gegenüberzustellen und dabei konsistenzabhängige Merkmale abzuleiten, lässt sich eine Bewertung realisieren.

6.1.5.6 Drehzahl- und Drehmomentengeführte Mischprozesse mit neuem Antriebsstrang

Nach dem Tausch des elektrischen Antriebs mit 45 kW Asynchronmotor durch den 75 kW Synchronmotor wurden die Versuche der Trajektorienvorgabe und der aus den Prozessdaten ableitbaren Merkmalen zur Beschreibung der Mischgüte fortgesetzt und weiterentwickelt.

So konnte das Protokoll und die Mischprozessdokumentation weiter verfeinert und verbessert werden. Mit den weiteren Mischversuche wurde die Methodenspezifizierung vorangetrieben und ein Archivsystem entwickelt und eingerichtet, in das die in den zahlreichen Versuchen der letzten Monate aufgezeichneten Prozessdaten eingelagert werden konnten, die in künftigen Vorhaben auch mit Instrumenten der künstlichen Intelligenz bewertet werden sollen, um in Weiterentwicklungen die Erfahrungen aus früheren Versuchen gewonnenen Kenntnisse zum Mischverhalten mittels Mustererkennung in zukünftige Entscheidungen einfließen zu lassen.

Im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" wurden mehr als 300 Mischversuche durchgeführt und ausgewertet, um die Potenziale einer Regelstrategie herauszuarbeiten, mit der infolge eines bedarfsgerechten Mischenergieeintrags in den Frischbeton, den Mischprozess zeitlich zu minimieren und in seiner Mischgüte zu maximieren.

Die mit den beiden Motorentypen in den Mischversuchen erzielten Ergebnisse führten zu vergleichbaren Aussagen, sofern auch mit dem leistungsstärkeren Synchronmotor eine drehzahlgeführte Mischprozessführung vorgenommen wird.

Wesentliches Element der rheologiegestützten Mischprozessführung stellt das neue und innovative CAVEX-Getriebe in Verbindung mit dem Synchronmotor dar, da mit dem Direktantrieb der beiden Mischwellen des Doppelwellenmischsystems im Vergleich zur standardmäßigen riemengeführten Kopplung von Motor und Getriebe verlustfrei Prozessdaten aus dem Antriebsstrang gewonnen werden können, wie diese für die Realisierung einer rheologiegestützten Mischprozessführung erforderlich ist.

Mit der in "Betonfahrbahn 4.0" realisierten Systemauslegung können nun die in der einschlägigen Literatur und in der Verfahrenstechnik zur Anwendung kommenden Messreihen und Auswertungen auch für die rheologische Bewertung von Frischbetonen im Mischsystem angewendet und erprobt werden. Bei rheometrischen Messverfahren werden Größen und Maße aus der Mechanik, wie etwa die Schubspannung, Scherrate, Viskosität usw. nicht direkt aus den Versuchen abgeleitet. Vielmehr müssen abhängig der rheologischen Eigenschaften der fluiden Systeme unterschiedliche Verfahrensweisen zur Anwendung kommen. Um rheologische Untersuchungen an Betonen mittels des hier zum Einsatz kommenden Doppelwellenmischsystems durchführen und bewerten zu können, wurden in den eigenen Softwareapplikationen spezifisch auf die Auswertung der Mischversuche zugeschnittene Mess- und Bestimmungsprozeduren entwickelt und umgesetzt.

Diesen Routinen liegen Prozessdatenschnittstellen und Protokolldefinitionen zur Nutzung in Abläufen der rheologischen Mischprozessführung zugrunde. Die im Vorhaben entwickelten Methoden und Verfahren verfügen über eine prinzipielle gleichartige Durchführungschronologie, um die spätere Auswertung der umfänglich archivierten Prozessdaten sicherstellen zu können.

Implementiert und erprobt wurde ein Verfahren zur Bewertung des Fließverhaltens. Das Ablaufprotokoll impliziert hierbei das Anfahren eines fertiggemischten Betons mit Drehmomentvorgabe als Systemeingangsgröße aus dem Ruhezustand heraus. Wie bereits angeführt, wird mit dem Erreichen des Mischendes die Mischerwelle angehalten. Mit der Bestimmung des sogenannten Losbrechmoments kann eine Beziehung zur Fließgrenze hergestellt werden. Der Kurvenverlauf der Datenpunkte aus Drehmoment und Drehzahl bei stufenweise steigendem Moment erlaubt, eine Fließkurve abzuleiten, die wie die Darstellung der Versuchsdaten des drehmomentgeführten Versuchs durch eine Ausgleichsgerade beschrieben werden kann. Die Steigung dieser Ausgleichsgerade steht wiederum in Relation mit der Viskosität des Frischbetons. So dass mit dem drehmomentgeführten Versuch entsprechend der Vorgehensweise die Wertepaare aus Fließgrenze und Viskosität eine eindeutige rheologische Charakterisierung der Betone erlaubt.

Zwar konnte im Rahmen der Bearbeitung des Verbundvorhabens "Betonfahrbahn 4.0" bis zum Projektende die Machbarkeit des rheologischen Bewertens von Frischbetonen belegt werden und erste Erkenntnisse an den ehedem komplexen plastisch-steifen Frischbetonen gewonnen werden. Bereits die aus den in den letzten

Projektwochen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen die enormen Potenziale einer rheolgiegestützten Mischprozessführung, um mit möglichst kurzer Mischdauer einen in seiner Konsistenz gleichförmigen Frischbeton herzustellen, der in seiner Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit den Anforderungen des Betonfahrbahnbaus nachkommt. Zudem können zumindest stichprobenartig die den Frischbeton eindeutig rheologisch kennzeichnenden Merkmale zur Qualitätssicherung im Mischsystem bestimmt werden. Diese erlaubt nicht nur die zuverlässige Bewerutng des Gemisches noch im Mischsystem, sondern sollte in Zukunft auch erlauben, prozessdatenbasiert die Nachdosierung von festen und fluiden Stoffen zur Anpassung des Konsistenzverhaltens des Frischbetons zu realisieren, um Abweichungen der Dosierung oder Feuchtegehaltsbestimmungen beim Mischen nach ausgleichen zu können.

6.1.5.7 Umbau des Antriebsstrangs der Technikums-Mischanlage

Nach Durchführung der ersten Mischversuchsreihen mit der standardmäßigen Liebherr Doppelwellenmischanlage und der Datenerfassung nebst Auswertung wurde in KW 16 der Antriebsstrang des DW1.25 ausgetauscht, um die im Fokus des Verbundvorhabens stehende Optimierung der Herstellung der Fahrbahnbetone mittels einer rheologiegestützten Mischprozessführung angehen zu können. Schließlich verfügt die Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage in ihrer Standardausführung über einen effizienten Antriebsstrang mit einem Liebherr-Planetengetriebe. Zwar begünstigt der gute Wirkungsgrad des Liebherr-Planetengetriebe einen optimalen Energieeintrag in das Mischgut, so dass sehr gute Mischergebnisse in kurzer Zeit erreicht werden. Allerdings weist der Standardantriebsstrang verfügt über einen Asynchronmotor als Antrieb und das Liebherr-Planetengetriebe. Die Kraft zwischen den parallelen Achsen des Motors und des Getriebes wird mit einem Riemen übertragen. Auf den Achsen des Motors und des Getriebes befinden sich Riemenscheiben, über die der Riemen läuft. Abhängig der Durchmesser der Achsen, wird die Geschwindigkeit geregelt, mit denen sich die beiden Scheiben bewegen. Vorteil des Riementriebes ist, dass nur geringe Wartungskosten anfallen, dieser ehedem kostengünstig ist, dieser leicht gewechselt werden kann und über eine lange Lebenszeit verfügt. Nachteil des Riemenantriebs ist die Möglichkeit des Rutschens. Infolge des möglichen Rutschens, der Schlupf, lässt sich die im Verbundvorhaben angestrebte rheologiegestützte Mischprozessführung nur bedingt realisieren, da infolge von Schlupf kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Drehbewegung der Motorwelle und der Getriebewelle besteht.

Entsprechend wurde vom Vorhabenpartner CAVEX ein neuartiges Schnecken-Planeten-Getriebe, das fest über eine Welle und somit schlupffrei die Kopplung von Motor und Getriebe ermöglicht. Damit kann über einen Frequenzumrichter der Motor gezielt so angesteuert werden, dass sich dessen Motorwelle mit einer beliebigen Drehgeschwindigkeit bewegt. Durch die feste Anbindung erfolgt die Drehbewegung unmittelbar auch am Getriebe, dessen Übersetzung dann die Geschwindigkeit der Mischwelle vorgibt.

Um nicht nur drehzahlgeführte Mischregime realisieren zu können, wie dieses über eine FU-Regelung mit allen Asynchron-Motoren möglich ist, sollte im Verbundvorhaben ein Synchronmotor zum Einsatz kommen. Hier wird ein konstant magnetisierter Läufer (Rotor) synchron von einem bewegten magnetischen Drehfeld im Stator mitgenommen. Der laufende Synchronmotor hat eine zur Wechselspannung synchrone Bewegung. Die Drehzahl ist also über die Polpaarzahl mit der Frequenz der Wechselspannung verknüpft. Mittels eines Frequenzumrichters lassen sich drehzahlvariable Antriebe mit großer Leistung realisieren. Vorteilhaft gegenüber Asynchronmotoren ist die starre Kopplung der Drehzahl und der Winkellage an die Betriebsfrequenz. Daher eignet sich der Synchronmotor für Anwendungen, die belastungsunabhängige, stabile Drehzahlen erfordern. Zudem sind permanentangeregte Synchronmotoren kompakter und effizienter als Asynchronmotoren. Für die rheologiegestützte Mischprozessführung von Bedeutung ist die Möglichkeit der Drehmomenterzeugung in Synchronmaschinen. So setzt sich das Drehmoment aus dem Reluktanzmoment und dem synchronen Moment zusammen. Hierzu wird die Drehzahl des Antriebs so lange gesteigert, bis gerade die Drehmomentvorgabe überschritten wird. Dann reduziert der Frequenzumrichter die Drehzahl und prüft stetig, ob das Solldrehmoment gehalten wird. Durch einen rasche Datenabtastrate von FU und Synchronmotor kann mittels Direct Torque Control (DTC) so der magnetische Fluss und das Drehmoment direkt und unabhängig voneinander in einem engen Toleranzband gehalten werden. Damit verbleibt die Drehmoment-Vorgabe stets innerhalb kleinster Schwankungsbreiten, wie dies für eine drehmomentgeführte Mischprozesssteuerung erforderlich ist.

Ziel der rheologiegestützten Mischprozessführung ist es, für die feinstoffreichen und wasserarmen Betongemische der Fahrbahnbetone den im Vergleich zu normalen Rüttelbetonen höheren Energieeintrag beim Mischen nicht durch längere Mischzeiten realisieren zu müssen. Vielmehr sollen mit dem neuartigen leistungsfähigen Antriebsstrang durch die effiziente Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit ein vollständiger Aufschluss aller Fein(st)stoffe erreicht werden, um so eine bestmögliche Homogenisierung mit einem höheren Energieeintrag zu realisieren.



Abbildung 6-89: Umgebaute Mischanlage am IWB mit neuem Motor und Getriebe

Es wird davon ausgegangen, dass mit einer bedarfsgerechten Anpassung von Werkzeuggeschwindigkeit und Motornennmoment der Aufschluss und die Homogenisierung des Gemisches beschleunigt und die Mischdauer minimiert werden kann. Nicht zuletzt soll das Antriebstrangkonzept auch zur qualitätssichernden Bewertung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons im Mischer genutzt werden. Diese Zusammenhänge konnten am IWB mit Labormischsystemen belegt werden. Eine Übertragung auf realmaßstäbliche Mischanlagen ist erstmals mit dem Einsatz des CAVEX-Planentengetriebes und des Einsatzes eines Leistungsstarken und FUgeregelten Synchronmotors möglich. Ein Antriebsstrang, wie er in der DW1,25 des IWB-Mischtechnikums verbaut wurde. Der Umbau des Antriebsstrangs erfolgte im Februar/März 2021. Das Foto in Abbildung 6.88 erlaubt einen Blick auf die umgebaute Mischanlage. Deutlich tritt das mächtige Bauvolumen des 75 kW-Synchronmotors in den Vordergrund. Dieser ist direkt an das neue CAVEX-Schnecken-Planeten-Getriebe angebunden, das über eine Welle direkt mit dem CAVEX-Getriebeblock der zweiten Mischwelle gekoppelt ist. Der Umbau des Antriebsstrangs der Mischanlage wurde in enger Abstimmung mit den Firmen Liebherr und CAVEX vorbereitet. Beide Unternehmen beteiligten sich auch bei der Installation und der Inbetriebnahme. Den Anschluss des Motors mit der FU-Regelung haben die Firmen Liebherr und ABB unterstützt und sorgten für eine reibungslose Inbetriebnahme vor Ort.



Abbildung 6-90: links oben: neuer Motor rechts: Beide CAVEX-Getriebe im eingebauten Zustand links unten: CAVEX-Getriebe während des Einbaus am Kran hängend

Die Abbildung 6.88 gibt einen Einblick über die Arbeiten, welche zur Umrüstung der Mischanlage durchgeführt wurden. Das obere Bild zeigt den neuen 75 kW Synchronmotor. Im Bild links unten ist das neue Schnecken-Planeten-Getriebe der Firma CAVEX zu sehen, das im Vergleich zum standardmäßig verbauten Liebherr-Planetengetriebe ein schlupffreies Umsetzen der Kraft ermöglicht. Mit dem Wegfallen des "Schlupfes", wie dieser im Keilriemenantrieb zwangsläufig möglich ist. Durch den größeren Motor musste ebenfalls das Gerüst der Anlage selbst umgeplant werden, um weiterhin alle Ebenen der Anlage erreichen zu können. Entsprechend wurde ein neuer Aufgang zur 2. Ebene beauftragt.

Ebenfalls wurden bei dem Umbau ein neuer Notauslass installiert und einige Ungenauigkeiten der Schließklappe behoben.

Allerdings musste nach dem Umbau des Antriebsstrangs festgestellt werden, dass der TAM-Sensor nicht mehr funktionierte. Da dieser für die rheologiegestützte Mischprozessführung von wesentlicher Bedeutung ist, musste eine Ersatzbeschaffung ausgelöst werden. Infolge weltweiter Lieferprobleme an elektronischen Bauteilen etc. dauerte die Auslieferung mehr als vier Wochen. Doch zeigte der Einbau des neuen Sensors, dass dieser gleichermaßen wie der zuvor verbaute Sensor softwareseitig nicht angesprochen werden konnte. Da die Einbindung des Drehgebers durch die Fa. ABB erfolgte, wurde diese beauftrag, die Fehlerursache herauszufinden und das Problem zu beheben. Nach mehreren Anreisen und Überprüfungen wurde dann mit großer zeitlicher Verzögerung der Fehler erkannt und auf vergleichsweise einfache Weise behoben. Die Mischanlage ist seit Mai 2021 nunmehr für die Durchführung der anstehenden Versuchsreihen und die Entwicklung und Erprobung eigener Mess- und Regelungsalgorithmen nutzbar.

6.1.5.8 Mischtechnische Untersuchungen mit dem Standardantriebsstrang der Liebherr-Mischanlage

Mit der Inbetriebnahme der Technikumsmischanlage wurde im Anschluss an die Inbetriebnahme und die Einweisung durch den Fachspezialisten der Fa. Liebherr sowie die dreitägige Unterstützung durch den Mischmeister und den Betontechnologen der Fa. Liebherr ein Untersuchungsprogramm vorgenommen, um den im Vorhaben seitens der Fa. Schnorpfeil im Demonstrator zum Einsatz gekommenen Ober- und Unterbeton in einem ersten Schritt als Referenz in der Konfiguration "Standardanlage" herzustellen und zu erproben.

Austausch des Asynchronantriebsmotors und Integration eines Drehgebers

Dank des im Frühjahr 2020 vorgenommen Austausches des 45 kW Asynchronmotors durch Liebherr, hier wurde erneut ein 45 kW-Motor nun aber mit einer längeren Motorwelle zur Aufnahme einer aktiven Motorkühlung und zum Anschluss eines TAM-Sensors installiert, bot die nunmehr ausgeführte Doppelwellen-Mischanlage im Mischtechnikum im Vergleich zur ursprünglichen Standardausführung die Möglichkeit, die Mischversuche einer elektronischen Leistungseintragsvermessung zu unterziehen und hier den standardmäßig mit der Steuerung von Liebherr vorgenommenen Prozess der Frischbetonherstellung zu erfassen und zu bewerten.

OPC UA-Schnittstelle und Zugriff auf Prozessdaten

Hierzu wurde zwischen Liebherr und IWB vereinbart, eine OPC UA-Schnittstelle im Steuerungssystem zu integrieren. Bei OPC UA handelt es sich um eine Technologie, die Interoperabilität im Fertigungsumfeld sicherstellt. Mit der Schnittstelle ist es zwischen allen freigegebenen Kommunikationsteilnehmern der Liebherr-Mischanlage möglich, Daten zu lesen, zu verarbeiten und ggf. auch Daten entsprechend einer Parameteroptimierung auszutauschen. Um entsprechende Dienste und Services nutzen zu können, musste eine kommerzielle SDK bzw. Open Source Bibliothek beschafft und integriert werden. Seitens der Systemelektronik von Liebherr wurde eine einfache Lösung zur Lesbarkeit von relevanten Prozessdaten geschaffen und bietet seit dem Spätsommer 2020 die Möglichkeit, alle für die Bewertung und die Regelung und Optimierung des Mischprozesses relevanten Prozessdaten zu sammeln, zu speichern, auszuwerten und zu analysieren.

Seitens des IWB musste eine Lösung entwickelt, implementiert und erprobt werden, mit der die freigegebenen Prozessdaten über ein OPC UA .NET SDK für Windows in .NET-Anwendungen für Windows nutzbar gemacht werden konnten. Hierzu musste eine kommerzielle Bibliothek mit einer dokumentierten Programmierschnittstelle beschafft werden, die ein schnelles Time-to-Market für die Implementierung der erforderlichen OPC UA-Funktionalität sicherstellt. Hierzu wurde eine Programmierschnittstelle in C# als OPC UA Client mit Microsoft C# unter .NET erstellt.

Im Automatisierungssystem der Liebherr Mischanlage sollte zunächst der OPC UA Server als Informationsserver dienen, um die einzelnen Komponenten bis hin zur gesamten Anlage abbilden und beschreiben zu können. Durch einen mit Zertifikaten geprüften und sicheren, verschlüsselten Zugriff ist der Betrieb und die Steuerung der Liebherr-Mischanlage ohne Gefährdung der Betriebssicherheit möglich. Mit der Schaffung der gemeinsamen Schnittstelle wurde seitens der Fa. Liebherr die gesamte Steuerung ausgetauscht und durch die neueste Generation der Liebherr Mischanlagen ersetzt.

Betoneinsatz	Unterbeton		Oberbeton		
	Einwaage [kg/m³]	Volumen [dm³/m³]	Einwaage [kg/m³]	Volumen [dm³/m³]	
0/4	589,9	205,6	536,5	204,7	
5/8	274,0	89,1	1282,9	415,7	
8/16	538,5	178,2			
16/22	652,5	212,4			
CEM I 42,5	350,0	112,9	420,0	135,5	
LP-Mittel	1,8	1,8	2,1	2,1	
Wasser	150,0	150,0	182,0	182,0	
Luftporen		50,0		60,0	
Gesamt	2505,7	1000,0	2423,5	1000,0	

Abbildung 6-91: Mischungszusammensetzung von Unter- und Oberbeton entsprechend Abstimmung mit Projektpartnern

Durchführung von Versuchsreihen mit dem 45 kW Asynchronmotor und Liebherr Standardgetriebe

Mit Betriebsbereitschaft des Standardmischsystems mit den modifizierten Erfassungsmöglichkeiten konnten Unter- wie auch Oberbetone mit der Technikumsanlage unter gleichen Bedingungen wie in der Baupraxis des Fahrbahnbaus hergestellt werden. Die in Abbildung 6.91 aufgezeigten Rezepturen wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern, insbesondere mit Fa. Schnorpfeil, ausgewählt und den folgenden Untersuchungen im Vorhaben zugrunde gelegt.

Die Mischungsrezepturen sowohl des Unter- wie auch des Oberbetons sahen einen w/z-Wert von 0,43 vor. Im Rahmen der Parameterstudien wurde daher untersucht, inwieweit sich mit der Erfassung der Prozessdaten mittels der OPC UA-Schnittstelle Unterschiede erkennen lassen, wenn das Gemisch anstelle eines w/z-Wertes von 0,45 einen etwas höheren Wert von w/z = 0,47 oder einen etwas niedrigeren Wert von w/z = 0,47 aufweist. Es wurde erwartet, dass sich mit einem etwas höheren w/z-Wert infolge der um kleine Nuancen weniger steifen Frischbetonkonsistenz die Leistungsaufnahme des Frischbetons etwas anders darstellen sollte, als wenn der Frischbeton im Vergleich zur Referenz von 0,45 einen w/z-Wert von nur 0,43 aufweist.

Entsprechend wurde nach erfolgreicher Implementierung der OPC UA-Schnittstelle und der Fertigstellung eines ersten Softwarecodes, mit dem die von Fa. Liebherr freigegebenen Prozessdaten während des Mischprozesse kontinuierlich ausgelesen und abgespeichert werden konnte, um im Nachgang an die Mischversuche diese mit entsprechenden MATLAB-Simulink-Programmen auswerten zu können. So wurden am IWB diverse Filterroutinen entwickelt, um das geeignete Verfahren herausarbeiten zu können, mit denen die umfangreichen Daten aller Messreihen auf spezifische den Mischverlauf wie auch den Status des Mischprozesses charakterisierende Muster der Messdaten ableiten zu können. Grundsätzlich handelt es sich hier um eine typische Aufgabe der Signaldetektion. So sollen Merkmale einer Extraktion unterworfen werden, um die Relevanz des Merkmals abhängig der Äqivalenzklassenzugehörigkeit oder auch der Diskriminierfähigkeit herausarbeiten zu können und um festzustellen, ob diese Merkmale generalisierbar sind. Wenn solche Merkmale identifiziert werden können, lassen sich diese in zukünftigen Mischprozessregelstrategien berücksichtigen, um den Mischverlauf derart zu optimieren, dass die geforderte Mischgüte, die sich durch ein hohes Maß an Homogenität und einen bestmöglichen Aufschluss aller Bestandteile auszeichnet, in möglichst kurzer Mischzeit zuverlässig erreichen lässt und ein stets gleichförmiger und robuster Frischbeton an das Transportfahrzeug aus dem Mischer übergeben werden kann.

Bereits die ersten Analysen der großen Messreihen eines Mischversuches verdeutlichten, dass im weiteren Verlauf des Verbundvorhabens die eindeutige Messungszuordnung und das parallele laden ganzer Messreihen eine große Herausforderung darstellen, die Messungen und deren Bewertungsergebnisse übersichtlich darzustellen. Zudem mussten Algorithmen erarbeitet und erprobt werden, um die Messdaten grafisch und analytisch dynamisch sichten und vergleichen zu können. Nur so lassen sich hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten in Anbetracht der großen Datenmengen erzielen. Zudem bedarf es der Integration von Methoden zur Verwaltung und Visualisierung großer multivariater Zeitreihen, um nicht nur häufige, sondern auch seltene Muster erkennen zu können. Mit der Schaffung der OPC UA-Schnittstelle konnten im Jahr 2020 die Forschungen am IWB nunmehr intensiviert werden, um die im Verlauf des Mischprozesses anfallenden Daten und datenreichen Messreihen nicht nur zu sammeln, sondern diese so zu analysieren und zu bewerten, dass neue und bislang unbekannte Erkenntnisse zum Einfluss der Art, Weise und Intensität des Energieeintrags der Mischwerkzeuge auf das im Verlauf des Mischens sich zeitlich stets verändernde rheologische Frischbetonverhalten des Frischbetongemisches gewonnen werden können.

Dem in Abbildung 80 aufgezeigten Mischversuch liegt das Vermischen eines Kubikmeters von beton zugrunde. Zunächst wurden im Automatikbetrieb der Liebherr-Steuerung, die Gesteinskornfraktionen dosiert und mit dem Beschicker dem Mischgefäß zugeführt. Parallel erfolgte die Zementeinwaage und deren Entleerung in den Mischer auf das Gesteinskorn. Das Gesteinskorn wird zunächst trocken mit dem Zement vermischt. Während des Dosierens der Gesteinskörnungen und des Zementes erfolgt auch die Einwaage des Wassers sowie die Dosierung des Luftporenbildners. Mit der Zugabe des Wassers wird der Automatikbetrieb des Mischers beendet und manuell der Liebherr-Steuerung das Signal gegeben, dass von nun an die Messdatenerfassung über den Client-Rechner des IWB erfolgt und dieser auch die Steuerung der Drehzahlregelung des Asynchronmotors übernimmt.

Dieser Zeitpunkt stellt den Nullpunkt der Diagramme in Abbildung 6.92 dar. Auf der X-Achse werden zur besseren Handhabung 10 Messpunkte je Sekunde dargestellt. Die drei übereinander angeordneten Diagramme zeigen die Drehzahl der Welle des Asynchronantriebes (oben), das Nenndrehmoment des Asynchronmotors (mittig) sowie den Verlauf der Leistungsbereitstellung des Motors (unten) auf. Der Startzeitpunkt der Messdatenaufnahme des IWB-Clients verdeutlicht, dass das trockene Vermischen des Gemisches aus Zement und Gesteinskorn die Mischwellengeschwindigkeit deutlich reduziert. Die Mischwellen werden bei voller Drehzahl des Asynchronmotors mit einer Geschwindigkeit von 21 m/s betrieben.



Abbildung 6-92: Messreihen mit dem Asynchronmotor für einen Mischversuch bei der Herstellung eines Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,43. Nach der Zugabe des Anmachwassers (x-Achse = 0) erfolgte ein 60 Sekunden dauernder Mischprozess (t = 600 pkt.). Anschließend wurde die Mischgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 10 Sekunden auf 0 zurückgefahren, bevor dann das Losbrechmoment bestimmt wurde, um über 30 Sekunden mit einer stufenweisen Anhebung der Motordrehzahl eine erste Analyse des rheologischen Verhaltens des Betongemisches mit dem Asynchronantrieb zu erproben.

oben: Motordrehzahl – während des Mischens max. Drehzahl 1.500 U/min, Geschwindigkeit der Mischwelle erreicht mit Keilriemenscheibe des Liebherr-Getriebes 21 U/min mittig: Nenndrehmoment des Asynchronmotors unten: Motorleistung

Direkt nach dem Zumischen der Trockenstoffe reicht das Leistungsvermögen des Antriebsstranges nicht aus, um die Mischwelle bei der vorgegebenen Drehgeschwindigkeit halten zu können. Mit der Zugabe des Zementes wird bereits im trockenen Zustand (ist auf der Darstellung noch nicht zu sehen) vor der Zugabe des Wassers erkennbar, dass das Vermischen besser erfolgen kann und es steigt die Drehzahl bei nahezu gleichbleibender Leistungsbeanspruchung des Motors langsam an. Mit der Zugabe des Wassers (Nullpunkt auf der X-Achse) kann zunächst eine weitere Zunahme der Drehzahl festgestellt werden. Doch zeigt sich darüber hinaus, dass vom Asynchronmotor ein höheres Nenndrehmoment abgefordert wird. Nach etwa 5 Sekunden wird die Solldrehzahl der Motorwelle von 1.500 U/min erreicht und das Nennmoment, das in diesem Moment den maximalen Wert einnimmt, fällt von nun an immer wieder ab. Auch die Motorleistung erreicht hier Ihr Maximum und nimmt im weiteren Ablauf des Mischens ab.

Der Mischprozess wird von der Wasserzugabe an von der IWB-Steuerung übernommen. Der IWB-Client übermittelt dabei dem Liebherr-System die Drehzahlvorgabe und ermöglicht somit das IWB-Mischregime. In 2020 wurde am IWB aber weniger die Übernahme des Mischregimes angestrebt, als über die OPC UA-Schnittstelle alle relevanten und von Liebherr freigeschalteten Prozessdaten auszulesen und im weiteren Projektverlauf auszuwerten. So ermöglichte die vorzeitige Umsetzung der OPC UA-Schnittstelle bereits mit dem Asynchronmotor in der Standardausführung die gewählten Grundversuche am Unter- und Oberbeton mit den in 2021 vorgesehenen Mischversuchen mit dem Wechsel auf den neuen Antriebsstrang zu vergleichen, um belastbare Datenanalysen vornehmen zu können, anhand deren aufgezeigt werden kann, dass mit einer in 2021 noch zu realisierenden rheologiegestützten Mischprozessführung eine gleichförmigere und homogenere Vermischung der anspruchsvollen Fahrbahnbetone sichergestellt werden kann, als dies in der Standardausführung erreicht werden kann.

Wird der Verlauf des Drehmoments bzw. der Leistungsbereitstellung zur Aufrechterhaltung der maximalen Drehzahl in Abb. 80 vom Nullpunkt bis zum Ende des Mischens nach 60 Sekunden (Datensatz Nr. 600) betrachtet, so lässt sich unschwer erkennen, dass die Kurvenverläufe des Nenndrehmoments und der Motor-Leistung starken Schwankungen unterworfen sind. Dies ist auf das Eintreten bzw. Austreten von Mischwerkzeugen aus dem sich stets weiter vermischenden und homogenisierenden Frischbetongemisches zurückzuführen. Werden die jeweiligen Werte der Maxima und Minima gedanklich miteinander verbunden, gewinnt man eine obere und untere Einhüllende, die immer näher zueinander findet. Auch wenn weitergehende Interpretationen erst mit den Versuchsreihen in 2021 vorgenommen werden können, da der neue Antriebsstrang in Verbindung mit dem Synchronmotor einen Einfluss von Schlupf etc. ausschließt, lässt sich bereits anhand der Messreihen mit dem Standardantriebsstrang ableiten, dass sich nach etwa 45 bis 50 Sekunden nur noch geringfügige Veränderungen im Mischverlauf feststellen lassen und nach 55 Sekunden das Nenndrehmoment wie auch die zugehörige Leistungsabgabe des Asynchronmotors auf einen konstanten oberen und unteren Wert einpendelt hat. Aus dem aufgezeichneten Mischprotokoll kann somit empirisch abgeleitet werden, dass nach spätestens 55 Sekunden die Stabilisationszeit, also das Mischende, erreicht wurde.

Alle weiteren Informationen der Diagramme in Abbildung 6.92, die den Zeitraum nach dem Erreichen des Mischendes betreffen, dienten einzig der Erprobung, inwieweit bereits am Asynchronmotor eine Drehzahlregulierung möglich ist, um im Nachgang an die Feststellung des Zeitpunkts der vollständigen Homogenisierung und damit Vermischung auch eine rheologische Charakterisierung des Frischbetons noch im Mischer möglich ist. Hierzu sollte das vom IWB patentierte Verfahren der Ermittlung des Losbrechmoments und der darauffolgenden Bestimmung einer Fließkurve zumindest in seiner technischen Umsetzung vorbereitend entwickelt und erprobt werden, wie dieses mit dem Umbau des Antriebsstrangs möglich sein sollte, da mit einem FUgeregelten Synchronmotor einen drehmomentgestützte Mischprozessführung realisiert werden soll. Dies ist trotz FU-Regelung mit dem Asynchronmotor nicht realisierbar. Für die Phase I, den Untersuchungen mit dem standardmäßigen Asynchronmotor sind die nach 600 Messpunkten (60 Sekunden) durchgeführten Versuche folglich nur bedingt verwertbar, dienten dem IWB aber, die später noch folgenden Versuche mess- und regeltechnisch vorzubereiten. Im Rahmen der Versuche von Phase I (Durchführung von Versuchsreihen mit der Standardausführung der Liebherr Doppelwellenmischanlage wurden die folgenden Versuchsreihen bis Ende März vorgenommen. Leider konnte infolge starker Regenereignisse in den Herbst- und Wintermonaten 2020 und der damit einhergehenden starken Feuchtegehalte der Gesteinskornfraktionen nicht immer entsprechend des Projektplans vorgesehene Mischversuche vorgenommen werden, da trotz mehrfacher Kalibrierung der Feuchtesonden bei schlechten Wetterverhältnisse keine vernünftige Feuchteregulierung möglich ist. Die Probleme und Erfahrungen wurden von den Verbundpartnern bestätigt und es blieben dem IWB nur begrenzte Zeitfenster, die während der Herbst- und Wintermonate geplanten Versuche witterungsabhängig durchzuführen.

Die Tabelle in Abbildung 6.93 zeigt auf, welche Versuchsreihe mit der Technikumanlage in Phase I, also in der Ausführung mit dem standardmäßigen Antriebsstrang mit Asynchronmotor und Liebherr-Getriebe, an den untersuchten Unter- und Oberbetonen durchgeführt wurden. Für jeden Beton wurden 2 Mischversuche vorgenommen, so dass in Summe 12 Untersuchungen erfolgten, an denen zum einen die kompletten Prozessdaten aufgezeichnet wurden und zugleich bei der Versuchswiederholung die Prozessdaten zur Charakterisierung des rheologischen Verhaltens der Frischbetone nach der Feststellung des Mischendes vorgenommen wurden.

Versuchs- reihe	w/z-Wert	Beton
1	0,45	Unterbeton
2	0,45	Oberbeton
3	0,43	Unterbeton
4	0,43	Oberbeton
5	0,47	Unterbeton
6	0,47	Oberbeton

Abbildung 6-93: Zusammenstellung der Versuche zur Analyse des Einflusses des Mischprozesses auf das Frischbetonverhalten am Beispiel von Unter- und Oberbeton



Abbildung 6-94: Vergleichende Gegenüberstellung der Messreihen mit dem Asynchronmotor für Mischversuche zur Herstellung eines Oberbetons

links: w/z-Wert von 0,43 rechts: w/z-Wert von 0,47 (Hinweis: Motor-Leistung in Abbildung in [kW] (Hinweis: Motor-Leistung wie dargestellt in [W] In Abbildung 6-94 ist eine Gegenüberstellung der Prozessdaten des Antriebsstrangs für den reinen Mischvorgang für den frischen Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,43 den Prozessdaten für den frischen Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,47 einander gegenübergestellt.

Erkennbar zeigt die Gegenüberstellung die erheblich größere Anforderung an Mischenergie für den wasserärmeren Oberbeton, um diesen mit einem geringen w/z-Wert von 0,43 zu vermischen. So erfordert die Erreichung einer maximalen Drehgeschwindigkeit der Motorwelle eine maximale Motorleistung von nahezu 20 kW. Demgegenüber erfordert die deutlich wasserreichere Rezeptur des Oberbetons mit einem w/z-Wert von 0,47 nur noch eine Motor-Leistung von etwa 13 kW. Zudem lässt sich bei gleichem Füllvolumen entnehmen, dass der Widerstand des Frischbetongemisches gegenüber dem Ein- und Austreten der Mischwerkzeuge über den gesamten Mischverlauf hinweg deutlich geringer ist, was sich durch einen kleineren Abstand einer gedachten Einhüllenden von Maximal- und Minimalwerten des Nenndrehmoments und der Motoren-Leistung des Asynchronmotors ableiten lässt. Zudem lässt sich der Grafik entnehmen, dass der minimale Leistungsbedarf für das Gemisch bereits nach 45 Sekunden erreicht wurde, so dass der weitere Energieeintrag nicht zwingend zur Verbesserung der Mischqualität bzw. Mischgüte aufgebracht werden muss.

6.1.5.9 Mischtechnische Untersuchungen mit dem umgebauten Antriebsstrang

Der Einbau der CAVEX-Schnecken-Planeten-Getriebe in die Liebherr DW1,25 erfolgte nach Abschluss der Mischversuche von Frischbetonen in der Standardanlage in 2021 in KW16 und konnte in KW 18 abgeschlossen werden. Die in der Vorhabenbeschreibung aufgezeigten Mischversuchsreihen zur rheologie-gestützten Mischprozessführung werden seitdem in umfangreichen Mischversuchsreihen vorgenommen.

In einem ersten Schritt wurden zunächst die mit dem Standardantrieb vorgenommenen Versuchsreihen mit dem neuen leistungsstarken Antriebsstrang mit gleicher Werkzeuggeschwindigkeit nachgefahren. Mit dem Vergleich der aufgezeichneten Prozessdaten soll zunächst der Einfluss der unterschiedlichen Getriebeeinheiten, Liebherr-Standardantriebsstrang versus CAVEX-Direktgetriebe, auf den Mischverlauf herausgearbeitet werden. Anschließend werden Versuche an dem in der Demonstrationsstrecke zum Einsatz kommenden Fahrbahnbeton durchgeführt. Hier werden die Effekte leicht variierender w/z-Werte, veränderlicher Zugabemengen von LP-Mittel und Fließmittel analysiert. Des Weiteren sollen Schwankungen der Gesteinskornschwankungen untersucht werden.

Eine wichtige Aufgabe der Untersuchungen besteht neben der Durchführung von Versuchsreihen zur Charakterisierung des Einflusses leicht schwankender bzw. variierender Ausgangsstoffe hinsichtlich Dosiergenauigkeit und Feuchtezustand auch darin, zu prüfen, inwieweit mit dem modifizierten Antriebsstrang eine rheologiegestützte Mischprozessführung ermöglicht, die aus den Schwankungen der Ausgangsstoffe resultierenden Einflüsse auf die Frischbetonkonsistenz mittels einer Optimierung der Mischprozessführung auszugleichen. In Labor-maßstäblichen Mischversuchen konnte mit FU-geregelten Labormischern an Standardbetonen und leicht fließfähigen bis hin zu selbstverdichtenden Betone aufgezeigt werden, dass mit einer rheologiegestützten Mischprozessführung eine Konsistenzhaltung innerhalb gewisser Toleranzgrenzen möglich ist. Mit dem Umbau des Antriebsstrangs der Doppelwellenmischanlage soll die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auch auf Fahrbahnbetone unter Beweis gestellt werden.

Durch das neue Schwerlastgetriebe wurde es möglich die Drehzahl des Mischerwerkzeuges beliebig nach oben und unten zu regulieren. Die Übersetzung von Getriebe zum Motor wird durch den Faktor i = 34 umgerechnet.

Dies bedeutet, dass eine Werkzeuggeschwindigkeit in der Mischhammer von 21 U/min erreicht wird, sofern der Drehgeber des Motors eine Drehzahl von 714 anzeigt.

Um die grundsätzlichen Charakteristiken der Mischprozessführung herauszufiltern und den Energieeintrag bestimmen zu können, wurde ein Mischplan erstellt, welcher sich in zwei Phasen unterteilt. Alle Mischungen der beiden Phasen wurden mit der Betonrezeptur von der Fa. Schnorpfeil gemischt welche auf der Demonstratorbaustelle A61 Boppard – Waldesch eingebaut wurden.

In Abbildung 6-94 ist die Phase I dargestellt. Hierbei wurde der Mischer bei einem gleichbleibenden w/z-Wert von 0,43, jeweils mit 1 m³, 0,625 m³ und 0,45 m³ Beton befüllt. Diese wurden dann mit fünf verschiedenen Geschwindigkeiten gemischt. Hierbei wurde die Untergrenze bei 21 U/min und die Obergrenze (Maximale Drehzahl) bei 44 U/min gewählt.

Die Untergrenze bezieht sich auf die vor dem Projekt BF 4.0 standardmäßige Geschwindigkeit der Firma Schnorpfeil, welche im Rahmen des Projektes auf 28 U/min angehoben werden konnte.

Mischvolumen/					
Mischwerkzeug Geschw. [U/min]	21 U/min	23 U/min	28 U/min	35 U/min	44 U/min (max)
1 m ³	х	x	x	х	
0,625 m ³	х	x	x	x	x
0,45 m ³	х	x	x	x	x

Abbildung 6-95: Phase I - w/z -Wert 0,43

Während der Durchführung der Mischungen der Phase I stellte sich heraus, dass bei dem verwendeten erdfeuchten und sehr steifen Beton der neu eingebaute 75 kW Motor bei einem Befüllungsgrad von mehr als 80 % an seine Grenzen kam, wodurch die Versuchsreihe mit einem Füllinhalt von größer gleich 1 m³ nicht abgefahren werden konnte.

Ferner ließ sich im direkten Vergleich der 0,45 m³ mit den 0,625 m³ Mischungen beobachten, dass die Messungen beim höheren Mischvolumen besser zu verarbeiten waren. Dies resultierte u.A. daraus, dass die Mischerschaufeln bei einem Füllstand von 0,45 m³ nicht gänzlich bedeckt waren. Durch die Unterdeckung der Mischerschaufeln war erkennbar, dass der eingefüllte Inhalt in der Mischkammer "herumflog" wodurch kein ordnungsgemäßes Mischen gewährleistet werden konnte.

In den folgenden Abbildungen werden die Messungen für die Ist-Geschwindigkeit, die Ist-Leistung und das Ist-Moment der Phase I – 0,63 m³ gegenübergestellt. Bedingt durch die fortlaufende Verbesserung und Erweiterung des zur Aufzeichnung eigens programmierten Programmes und die damit einhergehende Schwierigkeit dies im Automatikmodus zu implementieren, ergaben sich unterschiedlich lange Messdauern. Die reine Mischzeit jedoch, ist bei jedem Plott auf 50 s beschränkt. In Abbildung 6-95 sind die gemessenen Ist-Geschwindigkeiten dargestellt. Die Y-Achse zeigt einen nicht genormten Zeitstempel und die X-Achse die zum Zeitpunkt t gemessene Drehzahl.

Die Ist-Geschwindigkeit kann in 5 Abschnitte unterteilt werden, welche im Folgenden exemplarisch an der Abbildung 6-95 bis Abbildung 6-98, 23 U/min erläutert wird.

- Abschnitt I (0 450 U/min): Mischer läuft ohne Befüllung der Mischkammer
- Abschnitt II: (450 500 U/min): Mischer wird befüllt
- Abschnitt III (500 750 U/min): Anstieg der Geschwindigkeit auf Sollvorgabe
- Abschnitt IV (800 1350 U/min): Regulierung und Halten der Sollgeschwindigkeit
- Abschnitt V (1350 1650 U/min): Entleervorgang der Mischerkammer



Abbildung 6-96: Ist-Geschwindigkeit der Mischerwelle in Phase I mit 0,63 m³ Mischerinhalt

Bei dem charakteristischen Vergleich der Kurven ist erkennbar, dass die Drehzahl des Motors nach dem Befüllen der Mischerkammer (Abschnitt II) durch einen Widerstand absinkt. Im Abschnitt III versucht der Mischer die die Solldrehzahl zu erreichen, indem er diese erhöht. Kurz vor dem Übergang in Abschnitt IV lässt sich bei aller Kurve ein lokales Maximum erkennen. Dieses Maximum der Drehzahl ist deutlich über der Sollgeschwindigkeit wodurch anschließend runtergeregelt werden musste. Aus diesem Verhalten lässt sich ableiten, dass mehr Energie als tatsächlich notwendig verbraucht wurde.



Abbildung 6-97: Ist-Leistung der Versuchsphase I mit 0,63 m³ Mischerinhalt



Abbildung 6-98: Ist-Moment der Versuchsphase I mit 0,63 m³ Mischerinhalt

Die in Abbildung 6-99 dargestellte Versuchsphase II wurde nach der Analyse der Ergebnisse der Versuchsphase I entwickelt. Hierbei wurde untersucht, welche Auswirkungen die Wassermenge, welche dem Beton zugegeben wird auf die rehologischen Eigenschaften des Frischbeton hat. Hierfür wurden dieselben Mischergeschwindigkeiten wie in Versuchsphase I verwendet. Die in Klammer gesetzten Zahlen stellen die mit dem o.g. Faktor i = 34 umgerechnete Drehzahl des Motors dar. Bei den Versuchen der Phase II stellte sich heraus, dass die Entleerzeit der Mischerkammer stark von der Endgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge abhängt. Die Entleerzeiten sind in Abbildung 6-104 dargestellt. Aus den Messungen geht eindeutig hervor, dass eine beim Entleeren ein großes Potential existiert, um dem Mischprozess wirkungsvoll zu verkürzen.

Mischwerkzeug Geschw. [U/min] / w/z-Wert	0,41	0,42	0,44	0,45
21 (714)		х	x	х
23 (782)	х	х	x	х
28 (954)	х	х	x	
35 (1.190)	х	х	х	
44 (1.500)	x	X	х	

Abbildung 6-99: Versuchsphase II - Unterschiedliche Drehzahlen mit unterschiedlichen w/z - Werten

In Abbildung 6-100 wird ein Ausschnitt aus den Ergebnissen der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Phase I gezeigt. In dieser Tabelle ist erkennbar, dass sich das Verdichtungsmaß nur geringfügig durch die Mischgeschwindigkeit beeinflussen lässt. Anders verhält sich dies beim LP-Gehalt, der Dichte und der Druckfestigkeit.

Phase	Mischvolumer	w/z-Wert	Mischergesc hw. [U/min]	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Dichte	Druckfestigkeit	Probe Nr.
1	0,45 m ³	0,43	21	1,384	2,7	2545,8	62,56	А
I	0,45 m ³	0,43	18	1,4	3,6	2495,8	60,43	С
I	0,45 m ³	0,43	44	1,41	3,3	2516,35	59,25	E

Abbildung 6-100: Ausschnitt aus den Ergebnissen der Versuchsphase I

Um diesem Phänomen nachgehen zu können, wurde eine Trajektorie erarbeitet, welche in Abbildung 6.101 aufgezeigt ist. Bei dieser Versuchsreihe wurde die maximale Mischzeit von 50 Sekunden halbiert, wobei in den beiden Mischabschnitten die Drehzahl des Motors geändert wurde.

So wurde, am Beispiel der Probe F verdeutlicht, die ersten 25 Sekunden mit 21 U/min und die zweiten 25 Sekunden mit 35 U/min gemischt.

	Mischzeit	Mischzeit					
	25 s	25 s	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Dichte	Druckfestigkeit	Probe Nr.
U/Min	21	35	1,42	2,9	2539,57	50,92	F
U/Min	21	44	1,42	3,2	2529,87	55,62	G
U/Min	35	21	1,43	3,9	2566,1	58,51	н
U/Min	44	21	1,48	3	2534,05	58,9	I

Abbildung 6-101: Erste Trajektorie mit unterschiedlichen Mischzeiten und -geschwindigkeiten

Mit dieser Versuchsreihe konnte nachgewiesen werden, dass sich eine Änderung der Mischgeschwindigkeit unmittelbar auf die Frischbetoneigenschaft auswirkt. Dies ist z.B. deutlich am für den Einbau relevanten Verdichtungsmaß erkennbar sowie für den Frostschutz wichtigen LP-Gehalt erkennbar. Nach dem Durchlauf der ersten Trajektorie wurde die Mischung F und G (Abbildung 6-102) für weiter Untersuchungen ausgesucht. F und G diente hierbei zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit. Bei den Versuchsreihen G-1 bis G-5 wurde anstatt in zwei Phasen mit unterschiedlichen in bis zu vier Phasen gemischt. In Abbildung 6-102 sind die Versuchsreihen beschrieben, wobei t für die Zeit in Sekunden, v für die U/min des Mischwerkzeuges und die Eingabe für die vergebene Motordrehzahl in U/min steht.

Probe F					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	25	25	0	0	22
v	21	35	0	0	
Eingabe	714	1190	0	0	
Probe G					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	25	25	0	0	21
v	21	44	0	0	
Eingabe	714	1496	0	0	
Probe G-1					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	17	25	0	0	21
v	21	44	0	0	
Eingabe	714	1496	0	0	
Probe G-2					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	15	15	20	0	22
v	21	35	45	0	
Eingabe	714	1190	1530	0	
Probe G-3					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	8	12	13	17	22
v	21	28	35	45	
Eingabe	714	952	1190	1530	
Probe G-4					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	10	10	10	10	22
v	23	28	35	45	
Eingabe	782	952	1190	1530	
Probe G-5					
Mischphase	1	2	3	4	Entleerzeit [s]
t	5	5	10	15	21
v	28	28	35	45	
Eingabe	952	952	1190	1530	

Abbildung 6-102: Zweite Trajektorie der zu untersuchenden Mischregime

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Frisch- und Festbetonen für die Versuchsführung entsprechend der zweiten Trajektorie sind in Abbildung 6-103 aufgelistet. Unabhängig von den Verläufen der Ströme, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden, zeigten sich deutliche Unterschiede in den Messergebnissen.

Bemerkenswert ist exemplarisch der Vergleich der Mischungen G3 und G5 zu erwähnen.

Trotz marginaler Unterschiede in der Dichte und im LP Gehalt, weichen die Druckfestigkeiten und das Verdichtungsmaß stark voneinander ab. Dieser Unterschied kann auf die Art und Weise des Energieeintrags zurückgeführt werden.

Probe Nr.	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Gewicht Topf voll [g]	Dichte	Druckfestigkeit	Entleerzeit [s]
F	1,38	3,7	24290	2536,25	50,38	21
G	1,4	3,9	24248	2531	51,77	22
G1	1,4	3	24671	2583,87	42,92	21
G2	1,45	3,5	24505	2563,13	53,45	21
G3	1,43	3	24405	2550,63	48,76	22
G4	1,39	3,5	24350	2543,75	45,88	22
G5	1,34	3,1	24407	2550,87	39,62	22

Abbildung 6-103: Ergebnisse für die zweite Versuchstrajektorie des Mischregimes

U/min	Sekunden
21	12,5
23	14,5
28	15,1
35	18
44	21

Abbildung 6-104: Entleerzeiten des Mischers abhängig der Geschwindigkeit des Mischers zum Mischende

Die weiterführenden Arbeiten hatten zum Ziel, Methoden, Werkzeuge und Prozeduren zu erarbeiten, mit denen es möglich ist, anhand der beim Mischen aufgezeichneten Messdaten zum Motornennmoment, zur Drehzahl- bzw. Geschwindigkeit der Mischwelle etc. belastbare Aussagen zu der sich während des Mischverlaufs stetig verändernden Mischqualität zu erhalten, um einerseits das Erreichen der Stabilisierungszeit, den Zeitpunkt des Mischendes, feststellen zu können und andererseits einen optimierend-regelnden Eingriff in den Mischprozess zu gewähren.

Die konzeptionelle Idee, einen rheologiegeführten Mischprozesses im realen Mischbetrieb umzusetzen, erfordert, einige Aspekte aus der Theorie der Regelung elektrischer Antriebe zu berücksichtigen. Die wichtigsten Grundlagen werden nachstehend zusammengefasst.

Werden komplexe Anlagensysteme wie der Antriebsstrang eines Mischsystems betrachtet, müssen die funktionalen Einheiten des Gesamtsystems strukturell geordnet werden, um das Zusammenwirken der Einzelkomponenten programtechnisch nachbilden und in numerischen Betrachtungen analysieren zu können. Da im Vorhaben die rheologiegestützte Mischprozessführung umgesetzt werden soll, müssen das dynamische Verhalten des Gesamtsystems sowie die funktionalen Systemkomponenten im Einzelnen so weit formalisiert werden, dass die Implementierung von Regelstrategien möglichst modellbasiert erfolgen kann. Die konzeptionelle Idee eines rheologiegeführten Mischprozesses erfordert bei ihrer Umsetzung, einige Aspekte aus der Theorie der Regelung elektrischer Antriebe zu berücksichtigen. Diese werden nun in geraffter Form aufgezeigt.

Bei der Betrachtung solch komplexer Anlagensysteme ist es erforderlich, die funktionalen Einheiten des Gesamtsystems strukturell zu ordnen um sich das Zusammenwirken besser erschließen zu können. Zum Zweck einer Umsetzung der rheologiegestützten Mischführung ist das Dynamikverhalten im Gesamten sowie die funktionalen Einheiten im Einzelnen soweit zu formalisieren, dass die Implementierung von Regelstrategien möglichst modellbasiert erfolgen kann.



6.1.5.10 Umsetzung einer rheologiegestützten Mischprozessführung

Abbildung 6-105: Prinzipielle Regelstruktur eines Antriebsstrangs zur Umsetzung einer rheologiegestützten Mischprozessführung

Die funktionalen Einheiten der hierarchisch übergeordneten Ebene sind hierbei:

- Einheiten für die Umwandlung elektromechanischer Energie elektrische Maschinen
- Transformatorische Einheiten für die Bereitstellung elektrischer Größen Strom/Umrichter
- Einheiten zur Bereitstellung relevanter Zustandsgrößenverläufe Sensoren
- Kommunikationseinheiten zur Führung, Überwachung und Regelung Leitsystem

Das vorrangige Ziel der weiterführenden Arbeiten bestand nun darin, Methoden, Werkzeuge und Prozeduren zu erarbeiten, welche es möglich machen würden, Aussagen hinsichtlich der Mischqualität während des Mischvorgangs zu treffen und ferner einen optimierend-regelnden Eingriff in den Prozess zu gewähren.

Neben einer Sollgrößenkorrektur von Drehzahl oder Moment, könnte bei zu steifer Konsistenz mit einer bedarfsgerechten Nachdosierung von Fließmittel oder bei zu weichem Frischbeton durch Zugaben von etwaigen Stabilisierern, oder auch anderen geeigneten Betonzusatzstoffen, die Erzielung der geforderten Frischbetonkonsistenz bereits im Mischer erzielt werden.

Festgelegte Gütekriterien würden dann, während eines Mischprozesses auf ihre Gültigkeit hin überprüft und ggf. durch neuaktualisierte Sollvorgaben der Regelgröße korrigiert werden.

Das hierzu bislang umgesetzte Konzeptniveau ist rudimentär. Ist jedoch in seinem Gesamtbestand aus Kommunikationsprotokollen, einem Steuerinterface, Quellcodedokumentation und etlichen Analysewerkzeugen vollständig und stellt eine, in sich abgeschlossene und arbeitstüchtige Softwareapplikation bereit. Es erlaubt bereits zu diesem Zeitpunkt die grundlegenden Vorhaben umzusetzen und bietet ferner die Möglichkeit für ergänzende Erweiterungen im Sinne der Qualitätsverbesserung einer zielsicheren Herstellung komplexer Betongemische. Die Bereitstellung von Leistungs- und Maschinendaten, welche die Grundlage einer Analyse und/oder Interpretation sind, ist, wenn auch von rein operativer Natur, ein prinzipieller Schlüsselschritt und wird an dieser Stelle eingehend erläutert.

In erster Linie impliziert es die Erarbeitung einer zyklischen Datenaustauschstruktur, aus - lesenden, verarbeitenden und schreibenden Routinen.

Konkret handelt es sich um Kommunikationsschnittstellen zum Austausch von Prozess- und Maschinendaten zwischen den einzelnen Komponenten des Steuer- und Regelteils einerseits und des Leistungsteils andererseits.

Der prinzipielle Aufbau der erwähnten Bestandteile des Gesamtsystems, ist schematisch in der nachfolgenden Abbildung 6-106 illustriert.



Abbildung 6-106: Gesamtsystem des am IWB realisierten Mess- und Regelsystems

Von zentraler Bedeutung ist das sog. OPC-UA Kommunikationsprotokoll. Ohne hier genauer ins Detail zu gehen ist es wichtig festzuhalten, dass damit eine Kommunikation zwischen der Steuerungsebene, dem Leistungsteil und dem User-Interface ermöglicht wird.

Ausgewählte Systemgrößen werden auf dem OPC Server in Form eines Strukturbaums aus deklarierten Datennodes hinterlegt und können online eingesehen und verändert werden.

Der operative Zugriff auf benötigte Datennodes erfolgt dann mithilfe eines auf .NET-SDK basiertem Client. Der Client wurde hier in C# erstellt. Es liest und schreibt formatgebundene I/O-Files. Zum einen sind es die Datenfiles ausgewählter Systemgrößen. Darunter die Drehzahl, das elektrische Moment, die Scheinleistung am Ausgang des Umrichters, sowie die drei Phasenströme, welche auf die Statorwicklungen gegeben werden.

Die Steuerungs- oder Kommunikationsfiles werden vom Client formatgebunden geschrieben und mit einem Zeitstempel versehend als Output-Files abgelegt bzw. an die übrigen Kommunikationspartner übergeben.

In Abhängigkeit dessen welcher Führungsmodus gewählt wurde – drehzahlgeführtes oder momentengeführtes Regime - übermitteln die Input-Files die Soll-Eingangsgrößen entweder für die Drehzahl oder das Drehmoment entsprechend.

Ferner sind es die Trigger-Files, die zur Vermeidung von Laufzeitfehlern und Zugriffskonflikten als Semaphoren fungieren. Sie bestimmen die Schreib- und Lesezeiten, managen also die Zugriffsreihenfolge zwischen Client und den übrigen Teilnehmern dieser Datenaustauschstruktur auf die jeweiligen I/O-Files.

Diese operative Ebene ist grundlegend für das weitere Vorgehen. Erst nach dem die Glieder dieser Prozesskette administriert, chronologische Abläufe festgelegt und die Kommunikationsroutinen implementiert wurden sind, können die eigentlichen Arbeiten in Angriff genommen werden.



Das skizzierte Prinzip ist in der untenstehenden Abbildung 6-107 dargestellt.

Abbildung 6-107: Kommunikationsbausteine der integrierten Systemkomponenten

Zum Treffen dezidierter Aussagen, so wie diese im Projektvorhaben annonciert worden sind, müssen Werkzeuge für eine vollumfänglichen Analyse bereitgestellt werden. Das bedeutet, der Anwender muss in der Lage sein, Prozeduren frei gestalten und die generierten Ergebnisse im Anschluss auswerten können.

Die entwickelten Applikationen wurden entsprechend angelegt und beinhalten sowohl eine Planungsumgebung wie auch eine Umgebung zur Auswertung und Analyse.

Beide Umgebungsebenen werden fortwährend erweitert und beinhalten mittlerweile etliche Features und Anwendungsroutinen. Eine grundlegende Anwendung ist etwa die Onlinevorgabe von Sollwerten für Moment und Drehzahl. Damit ist es möglich, während des Mischvorgangs dem System Steuereingriffe zuzuführen. Ebenso Features die zum Erstellen von Solltrajektorie verwendet werden können. Des Weiteren Prozeduren zur Bestimmung des Losbrechmoments und anderer Materialcharakteristika.

Die Analyseumgebung wurden vorzugsweise mit Auswertungsinstrumenten aus der Signaltheorie ausgestattet. Die Ideenanlage der analytischen Auswertung sah hier vor, über die Bewertung der Zustandsverläufe Rückschlüsse auf die Qualität der Mischung zu ziehen. Hierfür wurden Kennwerte und Gütekriterien formuliert, welche (nach unserem Dafürhalten) eine Mischung in ihrer Gesamtheit qualitativ und im Idealfall sogar eindeutig charakterisieren. Mittels signaltheoretischer Datenanalyse, sowohl im Zeit- wie auch im Bildbereich, können diese Kriterien für die jeweilige Mischung ausgewertet werden. Der Vergleich ausgewerteter Mischungen untereinander, liefert jedoch erst dann anwendbare und übertragbare Aussagen, wenn die konzipierten
Analysemethoden durch abermalige Verifikation und eine größer angelegte Datenbasis als die bislang vorhandene, ihre Tauglichkeit bewiesen haben. Vorerst handelt es sich lediglich um ein Analysekonzept in einer Erprobungsphase. Die vorläufigen Resultate berechtigen jedoch zur Annahme, dass der eingeschlagene Weg richtig konzipiert ist.

6.1.5.11 Drehzahlgeführte Mischversuche - Analysen der Prozessdaten der Versuche mit Asynchron-Antrieb

Es werden nun einige zentrale Prozeduren aufgezeigt, welche bei bisherigen Arbeiten prävalierten und im Sinne eines Endberichts als besonders relevant erscheinen. Die entwickelten Werkzeuge werden in ihrer Funktionalität erörtert und die dort gewonnen Ergebnisse anschließend oder begleitend dazu diskutiert.

Die anfängliche Kernidee bestand darin, mithilfe einer Trajektorienvorgabe aus vorgegebenen Sollwerten der Regelgröße auf definierten Zeitintervallen, Belastungstest durchzuführen. Die dadurch resultierenden Zeitverläufe der Zustands-, und Ausgangsgrößen, unterscheiden sich dann in Abhängigkeit der Materialkennwerte und Rezeptur, in Amplitude, Frequenz(en), Lastwechselgradienten, Einpendlungszeiten, So konnte beispielsweise die maximalen und minimalen Energieeinträge der Mischwerkzeuge über den Verlauf der Einhüllenden charakterisiert werden. Grundsätzlich ergeben sich zahlreiche, neue Interpretationsmöglichkeiten der Zustandscharakterisierung anhand aktueller oder aufgezeichneter Verlaufsgrößen.

Das Konzept wurde zunächst im drehzahlgeführten Regime erprobt. Dazu wurde ein Protokoll vereinbart, welches im Nachgang an einen standardisierten Mischvorgang von einer Dauer von 60 Sekunden, mehrere, hintereinander ausgeführte Lastwechsel bei festgeschriebenen Zeitintervallen durchführt.

Hierfür wurden vorab entsprechende Steuerungsfiles erstellt. Die dort eingetragenen Sollwerte der abzufahrenden Drehzahlgrößen, liegen in Form eines Spaltenvektors vor. Diese Sollvorgaben werden im Zuge der Prozedur, sukzessive, Zeilen um Zeile vom Client extrahiert und über die OPC UA Schnittstelle dem System als Eingangsgröße zugeführt.

Das erste Versuchsprotokoll sah fünf Mischsequenzen vor:

I. Mischen mit konstanter (geregelten) Drehzahl:

•
$$n_{soll} = 1500 \frac{U_{mdr}}{min}$$

II. Hartes Abbremsen auf Drehzahl:

•
$$n_{soll} = 0 \frac{U_{mdr}}{min}$$

III. Ausführen des ersten stufenförmigen Vorgabenprofils

•
$$\Delta n_I = 15 \frac{U_{mdr}}{min}$$

- In 10 Stufen auf $n_{soll} = 150 \frac{U_{mdr}}{min}$
- IV. Ausführen des zweiten stufenförmigen Vorgabenprofils
 - $\Delta n_{II} = 150 \frac{U_{mdr}}{min}$
 - In 9 Stufen auf $n_{soll} = 1500 \frac{U_{mdr}}{min}$
- V. Mischen mit konstanter Drehzahl (geregelt)

•
$$n_{soll} = 1500 \frac{U_{mdr}}{min}$$



Abbildung 6-108: Drehzahl-Zeit-Diagramm der Soll-Verlaufstrajektorie in definierten Mischsequenzen

Die verabredeten Drehzahlvorgaben in jeder einzelnen Mischsequenz, prägen dem System einen dazugehörigen Zustand auf und generieren entsprechende Systemantworten, welche ausgelesen und als Zeitverläufe der Zustands- resp. Ausgangsgröße dargestellt werden.

Exemplarisch für diese Versuchsreihe werden im Folgenden die Messergebnisse für drei ausgewählte Oberbetone mit den WZ-Werten von w/z={0,43;0,45;0,47} zusammengetragen und graphisch aufgezeigt.

Im Anschluss daran erfolgt die Auswertung und der Versuch einer Bewertung u.a. auch mittels der angedachten Analyseverfahren. In Abbildung 6-109 ist der Führungsgrößenverlauf im drehzahlgeführten Mischregime für den Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,45 aufgezeigt.

Die Nenndrehzahl des 45-kW Asynchronmotors wird mit $n_{max} = 1482 \frac{U_{mdr}}{min}$ angegeben. Der Gegenüberstellung des Verlaufs von n_{soll} und n_{ist} lässt sich gut entnehmen, dass die Drehzahlregelung des Umrichters sehr gut konditioniert ist und die hinterlegte PI-Regelung mit einer schnellen Nachstellzeit arbeitet.



Abbildung 6-109: Drehzahl-Zeit-Diagramm des Ist-Größenverlaufs im Falle von w/z=0,45.

Daraus können drei zwingende Folgerungen abgeleitet werden:

- 1. Eine konstante Ist-Drehzahl $n_{soll} = const$ ist eine notwendige Bedingung für eine fertige Mischung.
- 2. Eine hinreichende Bedingung hingegen, kann im drehzahlgeführten Regime nicht über die Drehzahl formuliert werden.
- 3. Für die Formulierung einer hinreichenden Bedingung sind die Verläufe der übrigen Zustandsgrößen hinzuzuziehen.

Punkt 3. dieser Aufzählungsliste ist im Grunde die eigentliche Kernaufgabe, welche es im Rahmen der rheologiegestützten Mischanalyse zu lösen gilt. Es ist die Beantwortung der Frage, wie auf die Güte einer Mischung geschlossen werden kann. Qualitätsaussagen müssen kriteriengestützt sein.

Im Falle, dass solche Kriterien formalisiert vorlägen, wäre es möglich in den Mischprozess regelnd und hinsichtlich einer noch zu formulierenden Gütefunktion optimierend einzugreifen.

Noch bevor die tatsächlichen Messreihen der ausgewählten Betone gezeigt werden, erscheint es zweckdienlich zu sein die zugrundeliegenden Arbeitsüberlegungen zu erörtern.

Da wie gerade festgestellt, eine konstante Drehzahl im drehzahlgeführten Mischregime, sowohl im Falle einer homogen- wie auch einer heterogenvorliegenden Mischmasse registriert wird, müssen andere Kriterien gefunden werden, anhand derer auf eine hinreichende Güte für ein Mischende zurückgeschlossen werden kann. Es bietet sich an, vorerst die Größenverläufen des Umrichters in Augenschein zu nehmen. Grundsätzlich moduliert der Umrichter den Netzstrom entsprechend dem Sollwert der Regelgröße und führt diesen dann dem Stator zu. Folglich kann man davon ausgehen, dass die Zeitverläufe bestimmter Zustandsgrößen, so etwa Strom, sich im Falle einer ideal vorliegenden Mischgüte (Idealfall), qualitativ von jenen Verläufen unterscheiden, welche während eines aktiven Regelvorgangs, also während der noch nicht erreichten homogenen Vermischung, entstehen.

Naheliegend ist z.B. der Gedanke, dass aufgezeichnete Idealverläufe der Ströme, ein Muster aus drei um 120° gegeneinander verschobenen Harmonischen ergeben würden, welche einem Mischgut mit homogener Struktur zuzuordnen wären. Eine Abweichung von diesem Idealmuster resultiert aufgrund einer Modulation durch den Umrichter infolge eines aktiven Regelvorgangs. Also dann, wenn das Mischgut noch nicht in der gewünschten Vermischungsqualität vorliegt und strukturelle Heterogenitäten aufweist.

Diese und andere Überlegungen sind zwar von idealisierter Natur, aber rahmengebend für das weitere Vorgehen. Die realgeführten Experimente prägen diesen Idealmodellen jedoch ihre zwingenden Korrekturen auf. Aufgrund der unbestreitbaren Systemkomplexität konnten daher noch nicht alle Fragen endgültig geklärt werden. So muss man an dieser Stelle konstatieren, dass die Mischgüte etwa, noch nicht über ein eindeutiges Kriterium abgelesen werden kann.

Die praktische Realisierung der Lösungs- und Analysekonzepte, konzentriert sich vorerst auf der Suche und Bewertung von geeigneten Filterverfahren, Validierung und Einstellung entsprechender Koeffizienten. (Vgl. Abbildung 6-110).



Abbildung 6-110: Analyse der Prozessdaten im Bildbereich

Letztlich handelt es sich um die Erarbeitung von Bewertungsmethoden einerseits und der Einpflegung von numerisch smarten Auswertungsroutinen der Echtzeitdaten in den Gesamt-Online-Prozess. Diese Arbeiten laufen noch an.

In Anlehnung an diese Überlegungen wurden Szenarien für die Abläufe von Ertüchtigungstests diskutiert und anschließend erprobt. Das Vorgehen wird exemplarisch für die drei Betone aufgezeigt. In der Abbildung 6-111 unten, sind die aufgezeichneten Verläufe der Führungsgrößen abgebildet.



Abbildung 6-111: Analyse der Prozessdaten für die drei Betone mit unterschiedlichen w/z-Werten. Führungsgrößenverlauf bei Vorgabe einer Drehzahl entsprechend dem Versuchsprotokoll.

In allen drei Fällen wird ein gutes Regelverhalten beobachtet. Der einzige markante Unterschied wird während der II. Mischsequenz registriert. Die Verläufe kennzeichnen sich durch jeweils unterschiedliche Gradienten im Zuge einer ausgeführten Hardbremsung auf $n_{soll} = 0 \frac{U_{mdr}}{min}$.

Das dem System aufgeprägte Bremsmoment erfährt offenbar, in Abhängigkeit des Falls, eine Dämpfung von unterschiedlich starker Ausprägung: $D_{0.47} > D_{0.45} > D_{0.43}$ (Durchs Ablesen).

Unterscheidbarer sind erwartungsgemäß die Verläufe nicht geregelter Größen, welche sich in Abhängigkeit der Drehzahlvorgabe in den jeweiligen Mischsequenzen einstellen. Die beobachteten Unterschiede können benannt und quantifiziert werden. Somit können den verlaufscharakterisierenden Merkmalen Werte zugeordnet werden.



Abbildung 6-112: Analyse der Prozessdaten im Zeitbereich

Die Merkmale sind z.B. die Amplitude oder die Anzahl der überlagerten Frequenzen, Verlauf (Gradient) der Einhüllenden, Dämpfung etc. Mittels einer geeigneten Filterung können auch weitere Merkmale extrahiert werden. Es ist dann eine Aufgabe für sich, die Art und Zweckmäßigkeit dieser Merkmale zu formulieren. Abbildung 6-112 zeigt die Arbeitsumgebung der Analyse-App in der aktuellen Version. Aufgezeichnete Datenverläufe werden im C#-Client formatgebunden geschrieben. In der App können diese dann geladen und als Excel-Tabelle abgespeichert werden. Eine solche Tabelle ist im App-Fenster rechts zu sehen. Einzelne Intervalle können per Auswahl mit der Maus in der Tabelle selbst, oder auch per Zahleneingabe im oberen Sub-Fenster oben links, angewählt werden. Im Plot-Fenster rechts daneben kann der zu analysierende Verlauf via Plot-Diagramm dargestellt werden. Das interessierende Teil-Intervall wird dann farblich markiert. Ferner kann dieser in einem weiteren Plot-Fenster, welches unter dem ersten angebracht ist, betrachtet und einer ersten qualitativen Analyse im Zeitbereich unterzogen werden. Etwa durch Einzeichnen der Einhüllenden, Ausführen einer Mittelwert-Filterung oder durchs Anzeigen von auftretenden Leistungsspitzen. Eine solche Diagnose erlaubt eine, wenn auch subjektiv-angehauchte Bewertung. In diesem Sinne erfolgt auch eine erste Filter-Analyse im Bild-Bereich. Im unteren linken Sub-Fenster befindet sich die Eingabemaske eines allgemeinen Bandpass-Filters. Das gefilterte Signal kann im dritten Plot-Fenster zusammen mit dem Ausgangsignal angezeigt und gegenübergestellt werden. Durchs Anjustieren der Filterkoeffizienten für die Dämpfungen, sowie der Sperr- und Durchlassbereiche kann der Anwender eine Validierung vornehmen und in Abhängigkeit des Sperrbreite bzw. des Spektrums unterdrückter Frequenzen, sich so ein vorläufiges Urteil zur Mischqualität insgesamt, sowie zu einzelnen Mischepisoden machen. Weitere Aussagen im Bild-Bereich liefert eine Korrelations- und Frequenzanalyse. Darunter - Erkennung von charakteristischen Mustern, Rauschfilterung, Extrahieren von Frequenzen etc. Implementierte Filterwerkzeuge werden durch Anklicken des Reiters "Bildbereich" in der unteren linken Taskleiste aufgeklappt. Die aktuelle Version wurde bereits in Abbildung 6-112 gezeigt. Die auf diese Weise gesammelten Charakteristika tragen einen komparativen Charakter. Das bedeutet, dass erst durch einen Merkmalenvergleich unterschiedlicher Verläufe untereinander, Qualitätsaussagen formuliert werden können.

Aber bereits aus den Zeitverläufen einzelner Mischsequenzen können erste Schlüsse gezogen werden: Man betrachte hierfür das Zeit-Motornennmoment-Diagramm in der *Abbildung 6-113*.



Abbildung 6-113: Analyse der Prozessdaten im Zeit-Motornennmoment-Diagramm

Die Zeitverläufe eines jeden Mischversuchs erlauben in jedem definierten Zeitintervall u.a. die operative Spannweite des Motornennmoments mit $S_P = |M_{max} - M_{min}|$ zu bestimmen. Entlang einer Mischsequenz im Zeitintervall $t_I \in \{0, 60\}$ kann $S_P(t_I)$ in Form einer Einhüllenden dargestellt werden. Eine solche zeigt *Ab*bildung 6-114 für den Fall w/z = 0,45.

Über den Einhüllendenverlauf kann eine qualitative Bewertung erfolgen. Für die WZ-Werte 0,45 und 0,43 ist die Spannweite und damit der Misch-Arbeitsbereich wesentlich größer angelegt als im Falle des w/z -Werts 0,47. Die erwartet *bessere* Durchmischung bei größerem Wassergehalt, findet hier ihre Entsprechung in Form eines schmaleren Einhüllendenverlaufs und man kann sagen, dass der Frischbeton mit einem w/z-Wert von 0,47 sich deutlich besser durchmischen lässt als die übrigen beiden Betone. Mit anderen Worten kann man, bemessen am Gradienten der Einhüllenden, Rückschlüsse auf den Progress der Mischung ziehen. Im Falle des WZ-Werts 0,47 ist eine schnellere Konvergenz in einen Mischzustand zu beobachten, für welchen angenähert $M \approx const$ bzw. $dM \approx 0$ gilt. In Anlehnung an die vorangegangenen Überlegungen aus der Präambel zu diesem Kapitel, kann weiterhin die Vermutung angestellt werden, dass in einem solchen Bereich der Mischzustand als angenähert-idealdurchmischt vorliegt.



Abbildung 6-114: Ausschnitt aus der Analyse-App zur Illustration des Vorgehens bei Signalanalyse und Bewertung im Zeitbereich.

Weiterhin sind die abnehmenden Amplitudenspitzen und die Verminderung des Spektrums der überlagerten Frequenzen im Zuge einer fortschreitenden Mischung, Indikatoren einer Mischgüteprogression. Diese Indikatoren lassen sich online – also während des Mischprozesses - beobachten, quantifizieren und folglich für die Bildung der Regelgrößenvorgabe in den nachfolgenden Zeitschritten verwerten.

Die aufgezählten Punkte finden sich so auch in der ersten Mischseqeuenz des Zeit-Leistung-Diagramms wieder. Abbildung 6-114. Die zweite Mischsequenz - Zeitintervall $t_{II} \in (60, 71)$ [sec] - weist in beiden Diagrammen einen vergleichbaren Verlauf auf.

Ein markanterer Unterschied zeigt sich hingegen in der dritten Mischsequenz – Zeitintervall $t_{III} \in (72, 112)$ [sec]. Die Gradientenprofile im Zeit-Momenten-Diagramm kennzeichnet sich hier durch starke Wertschwankungen aus, während der Anstieg im Zeit-Leistungs-Diagramm, einen vergleichsweise glatten und weniger indifferenten Verlauf nimmt.

Die Ursache für die merklichen Ausschläge der Momentenverläufe liegt darin begründet, dass das System in der Zeit zwischen zwei nacheinander folgenden Anstiegen der Sollgröße, es nicht schafft sich auf einen (stabilen) Arbeitspunkt einzustellen. Man registriert ein oszillierendes Antwortverhalten.

Der Vergleich aller drei Momentenverläufe der dritten Mischsequenz lässt vermuten, dass die sukzessive Steigerung der Sollgröße sich tatsächlich als ein nützliches *Diagnostikum* zur Bewertung und Kategorisierung von Betonen unterschiedlicher WZ-Werte erweisen könnte. Ebenso scheint es möglich zu sein auf unbekannte w/z-Werte eines Mischguts per Mustervergleich zurückzuschließen.



Abbildung 6-115: Analyse der Prozessdaten im Zeit-Leistungs-Diagramm

Auffällig in diesem Zusammenhang sind die Episoden zweier, in Abbildung 6-116 extrahierten Verläufe in den Intervallen $t_{III_1} \in (73, 77)$ [sec] und $t_{III_2} \in (98, 102)$ [sec].

Im Intervall t_{III_1} beobachtet man markante Amplitudenspitzen für die Betone mit den w/z-Werten w/z = 0,47 und w/z = 0,43. Die Gradienten dieser Verläufe haben dabei unterschiedliche Vorzeichen.

Die zweite Episode im beobachteten Intervall t_{III_2} weist in den Fällen für w/z = 0,43 und w/z = 0,45 größere Anstiege der Zustandsgröße M auf. Die Verlaufsmuster scheinen dabei annährend kongruent zueinander zu sein.

Diese Feststellungen deuten darauf hin, dass die Übereinstimmung der zeitlichen Intervallfenster der registrierten Amplitudenspitzen, kein Zufall ist und es sich hierbei um eine Systematik handelt.

Für präzise Aussagen nichtlinearer Vorgänge bedarf es im strengeren Sinne einer Modalanalyse. Dazu müsste man das nichtlineare System aus – Motor, Getriebe, Mischerwelle und Mischgut – in der Zustandsnormalform $\dot{x} = Ax + bu$, $y = c^T x$ aufstellen und die Systemmatrix A anschließend spektralzerlegen. Die Bearbeitung dieser Aufgabe steht noch aus. Qualitative Aussage können aber dennoch, wie gerade gezeigt wurde, aus den aufgezeichneten Zeitverläufen abgeleitet werden. Dabei sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen interpretativ und daher nur unter Vorbehalt als richtig zu bewerten.

In Vorgriff auf spätere Arbeiten zur modalanalytischen Betrachtung aber, soll die wesentliche Ideenalge in geraffter Form bereits hier skizziert werden. So ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Bestandsteile des Mischguts sich durch ihre spezifischen Eigenfrequenzen kennzeichnen. Diese finden ihre Entsprechung als sog. Eigenmoden des Gesamtsystems. Die Ausprägung dominanter Eigenmoden wiederum, könnte Informationen

über die Güte der Durchmischung liefern. Beim schrittweisen Anstieg der Solldrehzahl in der dritten Mischsequenz, erfährt das System Anregungen unterschiedlicher Frequenzen. Das System wird also angeregt und antwortet entsprechend. Ein idealdurchmischtes System hätte dabei nur eine Resonanzfrequenz. Ein heterogenes Gemisch hingegen mehrere. Kennt man nun die Eigenbewegungen der Mischgutbestandteile vorab, dann ist ihre Detektion ein Hinweis darauf, dass die Mischung noch nicht ideal vorliegt.

Es ist auffällig, dass im Falle von w/z = 0,47 keine merkliche Amplitudenspitze im *gelb-gerahmten* Intervall $t_{III_2} \in (98, 102)$ [sec] zu beobachten ist. Das feuchtere Mischgut scheint lediglich eine Episode mit einer *ausreißenden* Amplitudenspitze zu haben – Zeitintervall $t_{III_1} \in (73, 77)$ [sec] - was wiederum ein Indiz für eine bessere Mischgüte sein kann.

Die nachfolgende Mischsequenz IV mit den Anstiegsraten von $\Delta n_{II} = 150 \frac{U_{mdr}}{min}$ lässt weniger offenkundigen Schlüsse zu. Nichts sticht markant heraus. Ausgenommen die Beträge der ausgeprägten Amplitudenspitzen zu jeder Teilepisode. Im Falle von w/z = 0.47 antwortet das System träger als für w/z = 0.45 und w/z = 0.43.



Abbildung 6-116: Analyse der Prozessdaten im Zeit-Drehmoment-Diagramm

Auch die letzte Mischphase V ist ebenfalls aussagekräftig. Die drei Verläufe dieser Sequenz ähneln den Verläufen wie sie bereits am Ende der Mischsequenz I – Zeitintervall $t_I \in (50, 60)$ [sec] - beobachtet werden konnten. Das kann begründet werden. Wenn nämlich davon ausgegangen wird, dass zum Ende der ersten 60 Sekunden Mischdauer der Fahrbahnbeton weitestgehend fertiggemischt vorliegt, dann muss das charakteristische Verlaufsmuster dieses Mischzustands sich bei entsprechender Systemanregung wiederholen. So geschehen im Intervall $t_V \in (145, 152)$ [sec]. Letztlich ist der Einhüllendenverlauf am Ende der ersten Mischsequenz schmaler als am Anfang der ersten Sequenz. Zusätzlich kann ein Mittelwertverlauf bestimmt werden. Dieser fällt im Zuge der ersten 60 Sekunden Mischungsdauer ab, wobei die Abstiegsrate zunehmend kleiner wird. Es lässt sich also ein asymptotischer Verlauf erkennen. Wird dem System in der letzten Sequenz erneut die maximale Solldrehzahl aufgeprägt, dann erscheinen die charakteristische Verlaufsmuster in Form schmaler Einhüllenden- und annährend konstant verbleibender Mittelwertverläufe erneut. Unter Beachtung, dass zwischen dem Ende der ersten und dem Beginn der letzten Sequenz der Beton noch weitere Mischzyklen durchlief, werden diese Charakteristiken in der fünften Sequenz leicht stärker ausgeprägt sein zum Ende der ersten Sequenz.

Die vorgestellten Überlegungen werden auch in den Stromverläufen wiedergegeben. Siehe dazu Abbildung 6-117.

Entsprechend scheinen die vorgenannten Überlegungen schlüssig. Eine Modalanalyse sowie eine große Anzahl an weiteren Mischversuchen sind notwendig, um die angestellten Gedanken zu bestätigen und ferner ein theoretisches Kalkül zur Bewertung und Ablauf von rheologiegeführten Mischprozeduren zu formulieren.

6.1.5.12 Drehzahl- und Drehmomentengeführte Mischprozesse mit neuem Antriebsstrang

Entsprechend des im Projektvorhabens vereinbartem Austausch der elektrischen Kraftmaschine, wurde der 45 kW Asynchronmotor durch einen 75 kW Synchronmotor ersetzt. Die Ausführung mit einem neuen und innovativen CAVEX-Getriebe erlaubt im Vergleich zur standardmäßigen riemengeführten Motor-Getriebe-Kopplung, eine Kraft-Direktübertragung bei reduzierten Abtriebverlusten. Der Austausch wurde im April 2021 realisiert.

Der Ablauf von Ertüchtigungstest mit Trajektorienvorgabe wurde bei Versuchen am neu-konfigurierten System zunächst unverändert belassen. Das Protokoll erfuhr später, leichte - vorrangig den Quell-Code betreffend - verbessernde Modifikationen, wurde aber im Kern beibehalten.

Die laufenden Mischversuche dienten neben der Methodenerarbeitung vorrangig der Schaffung eines Archivs für eine spätere, statistische Datenerhebungen und Auswertungen.

Ansonsten führten die bisherigen Mischversuche mit den beiden Motorentypen zu Ergebnissen, die in ihrem Kern vergleichbare Aussagen erlaubten.

Daher ist die oben geführte Erörterung zur Methodenerarbeitung an dieser Stelle ausreichend und die dort präsentierten Ergebnisse können auf die Testläufe mit dem neuen Antriebsstrang übertragen werden.

Zur Klassifizierung und Erfassung rheologischer Daten, finden sich in der einschlägigen Literatur zahlreiche Messverfahren und Protokolle ihrer Durchführungen.

Ebenso wurden entsprechende Charakterisierungsmerkmale definiert, welche das Fließ- und Deformationsverhalten beschreiben. Vgl. [Metzger 2011]. Den rheometrischen Messverfahren ist dabei oftmals zu eigen, dass etwaige Größen und Maße aus der Mechanik, wie etwa die Schubspannung, Scherrate, Viskosität usw. nicht *direkt aus den Versuchen abgeleitet* werden können. Vielmehr müssen abhängig der rheologischen Eigenschaften der fluiden Systeme, der angewandten Messverfahren und zum Einsatz kommenden Auswertemethoden, unterschiedliche Verfahrensweisen berücksichtigt werden.

Für die Zwecke rheologischer Untersuchungen an Betonen mittels des hier behandelten Doppelwellenmischers wurden Mess- und Bestimmungsprozeduren als ausführbare Programme in die Bedienungsapplikation eingearbeitet.



Abbildung 6-117: Analyse der Phasenströme des Antriebs im Zeitverlauf

Diesen Routinen liegen verabredete Protokolle benötigter Verfahren resp. entsprechender Durchführungschronologien zugrunde.

Sämtliche Umsetzungen der noch nicht validierten Mischprozessführungskonzepte befinden sich noch in der Erprobungsphase und werden laufend modifiziert und erweitert.

Exemplarisch für die bereits umgesetzten Routinen, wird die Bestimmung des Fließverhaltens von frisch hergestellten Fahrbahnbetonen vorgestellt. Die Möglichkeiten zur Konstruktion von Messprozeduren werden dabei dadurch begünstigt, dass ein Mischregime sowohl drehzahl-, wie auch momentengeführt sein kann. Implementiert und erprobt wurde ein Verfahren zur Bewertung des Fließverhaltens, wie es in [PCT/EP 2016] beschrieben ist.

Das Ablaufprotokoll impliziert hierbei das Anfahren eines fertiggemischten Betons mit Drehmomentvorgabe als Systemeingangsgröße aus dem Ruhezustand heraus.

Bei einem festgelegten ΔM wird zu jedem äquidistanten Zeitpunkt t_m die Drehzahl des aktuellen Systemzustands abgefragt. Die Führungsgröße erfährt sukzessive einen Sollwertanstieg, bis die Drehzahl $n_m > 0 \frac{U_{mdr}}{min}$ ist. Sobald dieser Zustand registriert ist, bleibt M_n so lange beibehalten, bis die Konvergenzbedingung $n_{m+i} \approx n_{m+i-1} \approx n_{m+i-2} \dots$ bzw. $(n_{m+i} - n_{m+i-1}) < tol \forall i$ für die Dauer einer Mindestzeit von $T = i * \Delta t$, mit $\Delta t = t_i - t_{i+1}$ erfüllt bleibt.



Zeit t in [sec]

Abbildung 6-118: Drehmomentgeführte Analyse des Mischguts zur Bestimmung des Losbrechmoments und der anschließenden Bestimmung einer Fließkurve nach [PCT/EP 2016].

Es wird also darauf gewartet, bis das System einen stabilen Arbeitspunkt einnimmt. Die Konvergenzbedingung ist dabei eine Vereinbarung über ein Toleranzintervall und somit zugleich auch die Schwäche des Verfahrens. Sobald die Konvergenzbedingung registriert ist, wird die Führungsgröße um das definierte Inkrement auf $M_{soll} = M_{m+i+1} + \Delta M$ abermals erhöht. Der Verlauf der Führungsgröße aktueller Soll- und Istwerte wird während der Prozedur aufgezeichnet. Die so entstehenden Moment- und Drehzahlprofile werden übereinander aufgetragen. Es entsteht eine Fließkurve wie sie in Abbildung 6-118 aufgezeigt ist. Aus dieser lassen sich die Fließgrenze und die plastische Viskosität des Frischbetons ableiten.

Analyse der mit der Technikumsmischanlage hergestellten Frischbetone

Nachdem die Mischanlage im Technikum des IWB in Betrieb gehen konnte, wurden zahlreiche Mischversuche vorgenommen. Einige der hergestellten Frischbetone wurden im Gyrator untersucht, um nach dem Umbau des Antriebsstrangs in 2021 im Anschluss an die Herstellung der Frischbetongemische neben den Analysen zur rheologiegestützten Mischprozessführung bzw. Qualitätsbewertung der Frischbetone auch ergänzend der üblichen Frischbetonprüfungen je Mischung eine Charakterisierung der hergestellten Betone mit dem Gyrator vorzunehmen. Neben der Bestimmung des Verdichtungsmaßes (Unterbeton) und des Ausbreitmaßes (Oberbeton) werden die Betone auch mit dem Gyrator analysiert. Ziel ist es, anhand der in den Gyratorversuchen gewonnenen Verdichtungskurve auch Aussagen zur Grünstandfestigkeit zu erhalten. Gerade bei einem Abgleich mit den Erkenntnissen beim Einbau mit dem Experimentalprüfstand lassen sich ggf. wertvolle Kenntnisse zur Einbaubarkeit der Betone mit dem Gleitschalungsfertiger ableiten.



Abbildung 6-119: Probekörper nach dem Verdichten im Gyrator

In den nachstehenden Abbildungen 6-120 bis 6-121 wurden für die Zusammensetzung des Fahrbahnbetons, wie er in der bewehrten Bauweise zum Einsatz gebracht wurde, zusätzlich zu dem Frischbetoneigenschaften wie Verdichtungsmaß, Luftporengehalt und Frischbetonrohdichte auch die Verdichtbarkeit mit dem Gyrator untersucht. Dabei erwies sich als geeigneter Parameter für die Verdichtung des Betons mit dem Gyrator eine Druckbelastung von 220 kPa bei einem Winkel 2,28° und einer Geschwindigkeit zwischen 60 U/min und 70 U/min. Dies entspricht einer Dauer der Verdichtung von maximal einer Minute und zehn Sekunden. Mit diesen Parametern wird die Rohdichte gesucht, welche in etwa der theoretischen Frischbetonrohdichte von 2515,1 kg/m³ entspricht. Im ersten Schaubild wird eine Frischbetonrohdichte nach 70 Umdrehungen in Höhe von 2515,9kg/m³ (vgl. Abbildung 6-33) erreicht. Im zweiten Diagramm (vgl. Abbildung 6-34) sind es genau

2515,1kg/m³ und im dritten steigt die Frischbetonrohdichte auf Werte von 2518,6kg/m³ (vgl. Abbildung 6-35) an.

Grundsätzlich zeigt Die rote Kurve den Verlauf der Rohdichte in Abhängigkeit der Umdrehungen auf. Bis zur 30ten Umdrehung kann ein starker Anstieg der Rohdichte verzeichnet werden. Dieser flacht aber dann und nähert sich bei der 70ten Umdrehung asymptotisch einem Endwert. Die Höhenabnahme der Gyratorprobe, welche mit der blauen Kurve in den Diagrammen von Abbildung 6-120 bis Abbildung 6-122 gekennzeichnet ist, folgt auch einem asymptotischen Verlauf. Wird der Versuch nicht abgebrochen, kommt es bei weiteren Umdrehungen zu einem Fortschreiten der Höhenabnahme.

Da alle drei Versuche an unabhängigen Proben aus einer Mischung gemacht wurden und die mit dem Gyrator und seinen Parametereinstellen für den Beton der bewehrten Bauweise sehr nahe beieinander liegen, können die drei Gyratorversuche als Beleg erachtet werden, dass sich mit der Identifizierung der geeigneten Parameter von Druckbeanspruchung und Winkel eine Wiederholbarkeit der Versuche auch an unabhängigen Proben gewährleistet ist.

Entsprechend lassen sich mit bekanntem Wert der theoretischen Frischbetonrohdichte von Unterbeton, Oberbetons oder unbewehrter Fahrbahnbeton der 2. Demonstrationsstrecke mit den zugehörigen Parametern von Druckbeanspruchung und Winkel, die im Gyratorversuch für die einzelnen Betonarten zu bestimmen sind, die für die Erzielung der Frischbetonrohdichte zugehörige Druckkraft mit dem Gyrator bestimmen.

Wird folglich die Druckbeanspruchung und der Winkel konstant gehalten, lassen sich aus der erzielten Frischbetonrohdichte Aussagen treffen ob infolge einer Abweichung von der theoretischen Frischbetonrohdichte ein zu weicher oder ein zu steifer Beton mit dem Mischansatz hergestellt wurde.

Grundsätzlich eignet sich aus Sicht der Verfasser der Gyrator in sehr guter Weise, Informationen zur Verarbeitbarkeit von grünstandfestem Beton, wie der mit dem Gleitschalungsfertiger einzubauenden Fahrbahnbeton mit der Durchführung der Versuche zur erhalten. Allerdings ist hierfür ein erheblicher experimenteller Aufwand erforderlich. Für den Baustelleneinsatz erweist sich der Gyrator selbst als nur bedingt geeignet, mobil mit der baustellenspezifischen Flexibilität bzgl. Aufstellort etc. auch die erforderliche Akzeptanz zu finden.



Abbildung 6-120: Ergebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des zweiten Demonstrators an einer unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstellungen wurden in Vorversuchen bereits bestimmt.



Abbildung 6-121: Ergebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des zweiten Demonstrators an einer unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstellungen wurden in Vorversuchen bereits bestimmt.



Abbildung 6-122: Ergebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des zweiten Demonstrators an einer unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstellungen wurden in Vorversuchen bereits bestimmt.

6.1.5.13 Erprobung und Tests Cavex Getriebe im Großtechnikum von Liebherr

Um die realmaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen vorzubereiten und die realen Getriebe für die Verwendung innerhalb der Mischanlage zu qualifizieren, wurden diese im Großtechnikum an einem Mischer DW 2.5 getestet, siehe Abbildung 6-123.



Abbildung 6-123: Getriebe Teststand am DW2.5 mit Cavex Getriebe

In Abbildung 6-124 sind die Temperaturverläufe für das Getriebe dargestellt. Deutlich sichtbar sind die Temperaturanstiege für das Getriebe welche schnell steigen und stationär gegen >100°C gehen. Am Getriebeprüfstand war keine aktive Kühlung verbaut. Auch ist eine deutliche Temperatur Differenz zwischen linkem und rechtem Getriebe zu erkennen. Dies liegt vermutlich ursächlich in der unterschiedlichen Belüftung der beiden Getriebe aufgrund der Einbausituation. Aufgrund der gemessenen Temperaturen wurde für die Verwendung innerhalb der realen Mischanlage und des realen Betriebes eine aktive Ölkühlung vorgesehen.



Abbildung 6-124: Temperaturdifferenz von 16 °C zwischen li/re Getriebe bei einer Mischerdrehzahl von 30 1/min und 75 kW

Die Mischer Leistung und notwendigen Drehmomente und Signale sind in Abbildung 6-125 und Abbildung 6-126 dargestellt. Gut zu sehen sind die deutlichen Momenten Schwankungen beim Eintauchen der Schaufeln, sowie der periodischen Störungen durch die Verspannung der beiden Getriebe. Der Leistungsbedarf der Getriebe sowie die maximalen Momente verbleiben beim Getriebe innerhalb der vorgegebenen Grenzen, somit ist zu erwarten, dass das Getriebe für den Einsatz innerhalb der realen Mischanlage tauglich ist.



Abbildung 6-125: Drehmoment und Leistung für unterschiedliche Drehzahlen am DW 2.5



Abbildung 6-126: Detailausschnitt des Drehmoments und der Leistung für zwei Drehzahlen am DW 2.5

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Akzeptanz ist die Schallemission des Antriebstranges. Hierbei wird die Hauptlärmemission von dem Getriebe verursacht. Es wurde die Schallemission an sieben Postionen im Abstand von 2,35 m vom Zentrum radial um den Mischer verteilt gemessen und gegen das Seriengetriebe verglichen. Die Messpositionen sind schematisch in Abbildung 6-127 dargestellt.



Abbildung 6-127: Schematische Darstellung der Messpositionen.

Das Cavex Schnecken-Planetengetriebe ist im Vergleich mit anderen Getrieben am geräuschärmsten. Der maximale Schalldruckpegel ist über die sieben Messpositionen in Abbildung 6-128 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Schalldruckpegel an Messposition 4 mit 76 dB(A) direkt vor den Getrieben am stärksten ist und bis zu den Messpositionen 1 und 7 neben dem Mischer auf einen Minimalwert von 71 db(A) abnimmt.



Abbildung 6-128: Maximaler Schalldruckpegel der sieben Messpositionen.

Die Abbildung 6-129 zeigt den Frequenzgang der Schalldruckmessung. Bei einer Frequenz von 30 Hz kommt es zu einem erkennbaren Schalldruckpegelpeak. Der Peak liegt bei 30 bis 40 dB an den Messstellen 4, 5 und 6. Bei ~1100 Hz und ~3500 Hz sind ebenfalls Peaks zu erkennen. Grund hierfür sind vermutlich die Zahneingriffsfrequenzen bzw. deren Oberfrequenzen.



Abbildung 6-129: Frequenzgang der Schalldruckmessung.

6.1.6 B1.6 - Realmaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen

Die Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen B1.2 und B1.4 wurden systematisch auf die realmaßstäbliche Herstellung von Fahrbahnbetonen übertragen. Im Arbeitspaket B1.5 wurden die neuartigen Bewertungsmöglichkeiten der beim Mischen anfallenden Prozessdaten, wie diese über eine OPC UA-Schnittstelle aus der Technikumsanlage zur Verfügung stehen, aufgezeigt. So wird bereits allein mit der Integration eines Frequenzumrichters ermöglicht, alle für den Mischprozess relevanten Informationen des Asynchronmotors auszulesen. In Verbindung mit einem Drehgeber können dann die tatsächlichen Drehbewegungen des Antriebsmotors wie auch dessen Nenndrehmoment und Leistungsbereitstellung stetig erfasst und bewertet werden. Erste Entwicklungen konnten gleichermaßen bereits vor dem Austausch des Antriebsstrangs belegen, dass mit der FU-Regelung die Drehzahl der Mischwelle angepasst werden kann. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass die mit dem Liebherr-Standardgetriebe bei voller Drehzahl des Antriebsmotors von 1.500 U/min über die Keilriemenscheiben eine Geschwindigkeit der Mischwelle von 21 U/min realisiert wird.

Um die Mischwellengeschwindigkeit in der Schnorpfeil-Anlage vor dem Bau des 1. Demonstrators zu erhöhen, wurde ein Tausch der Keilriemenscheibe vorgenommen. Die Geschwindigkeit der Mischwelle konnte damit von 21 U/min auf 23 U/min gesteigert werden. Doch zeigten bereits die ersten Versuche in der modifizierten Schnorpfeil-Mischanlage, dass infolge der etwas höheren Mischwellengeschwindigkeit und des daraus folgenden höheren Mischenergieeintrags eine bessere Mischgüte erreicht werden konnte und somit eine Reduktion der Mischzeit um einige Sekunden realisierbar wäre.

Da in der IWB-Mischanlage des Technikums mit der im Antriebsstrang integrierten FU wie auch des ergänzend installierten Drehgeber über die OPC UA-Schnittstelle nicht nur die Prozessdatenerfassung und deren unmittelbare Bewertung möglich waren, sondern auch eine Vorgabe der Drehzahl des Asynchronmotors vorgenommen werden konnte, war es möglich, bis zum Umbau des Antriebsstrangs bereits in Phase I die Drehzahlführung des Mischprozesses zu erproben. Bei all den Untersuchungen konnte aber die Geschwindigkeit der Mischwelle nicht gesteigert werden, da diese wie in allen Standardanlagen über die Keilriemenscheibe nach oben fixiert ist. Niedrigere Drehzahlen lassen sich demgegenüber auch mit Asynchronantrieben über die FU realisieren.

6.1.7 B1.7 - Erfassung und Aufbereitung aller prozessrelevanten Daten für die Prozessleitebene

Ziel dieses APs ist es, die exemplarisch erfassten Daten bei den Baustellenanalysen zu kategorisieren und in eine geeignete Form zur Übermittlung und Verwendung in einer Prozessleitebene umzuwandeln. Dazu wurde bereits im Zuge der Baustellenanalyse Köln-Wahn und Wittlich die automatisierte Datenaufzeichnung getestet. Dazu wurde die Mischanlage zusätzlich zur Auftragsverwaltung, welche bereits durch eine Datenbank verwaltet wird, ein Datenlogger eingebaut, welcher mit bis zu 100 Hz Signale wie z.B. Drehzahl und Leistung erfassen kann. Analog dazu wurden Signale, welche der Fertiger intern erfasst, gespeichert und den Konsortialspartnern zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Eine Überwachung des Transports kann entweder über BPO oder eine GPS- oder WLAN-basierte Positionsbestimmung erfolgen.

Vorbereitende Maßnahmen zur Synchronisation und Datenaufbereitung wurden dabei bereits in AP A1.8 beschrieben und werden in AP C3 im Rahmen des Prozessleitsystems konkretisiert. Die automatisierte Übertragung der Daten an einen zentralen Leitserver, wie er am ISYS aufgebaut wurde, konnte erreicht werden.

Im Zusammenarbeit mit der Fa. Liebherr wurde ebenso ein Konzept der automatisierten Datenübertragung erarbeitet. Dazu wurden die Daten der Mischanlagendatenbank in einem ersten Versuch per VPN direkt in die Datenbank am ISYS geschrieben. Erste Tests der Schnittstellen waren dabei erfolgreich und werden für einen Einsatz auf der Baustelle vorbereitet. Die finale Realisierung über eine Web-Schnittstelle (RESTful API) bei der die digitalen Lieferscheine nach Produktion übertragen werden ist in AP C3.3 näher beschrieben. Im August/September 2020 konnte die Mischanlagenschnittstelle an der technikumsmaßstäblichen Mischanlage des IWB durch das ISYS zusammen mit Liebherr erfolgreich in Betrieb genommen werden. Nachdem der störungsfreie Betrieb gewährleistet werden konnte, wurde die mischerseitige Implementierung in den realen Baustellenbetrieb von Schnorpfeil integriert.

6.2 ARBEITSPAKET B2 – METHODISCHE ENTWICKLUNG VON MESSSYSTEMEN

Die endgültigen Fahrbahneigenschaften Griffigkeit, Lärmentwicklung und Dauerhaftigkeit sind maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit der Betonoberfläche abhängig. Entsprechend wird die Fahrbahnoberfläche heute zumeist als Waschbeton ausgebildet. Hierzu wird nach dem Glätten des Oberbetons die Oberfläche mit einem Verzögerer besprüht, um nach ausreichender Liegezeit der Fahrbahn und ausreichender Erhärtung des Fahrbahnbetons die oberflächennahe Mörtelmatrix, die infolge der inhibierenden Wirkung des Verzögerers nicht erhärten konnte, mit einer rotierenden Bürste zu entfernen. Zur prozesssicheren Ausführung der Betonfahrbahn muss dieser Zeitpunkt auf reproduzierbare Messgrößen zurückgeführt werden können. Insbesondere der Erstarrungsbeginn des verwendeten Betons stellt einen wesentlichen Parameter der Verarbeitungsprozesskette dar. Derzeit ist beispielweise die maximale Verarbeitungsdauer bei Verwendung von Betonen mit FM auf 30 Minuten nach Fließmittelzugabe beschränkt. Auf Basis von Ultraschallmessungen kann die Verarbeitungszeit für verschiedene Standardmischungen unter dem Einfluss unterschiedlicher intrinsischer und Umgebungsparameter genau bestimmt und somit die Prozessflexibilität in der Mischanlage, beim Transport und beim Einbau optimiert werden.

6.2.1 B2.1 - Integration von Technologien zur Erfassung und Bewertung der Fahrbahn im Betrieb

Die optimierten Frischbetone standen im Berichtszeitraum noch nicht zur Verfügung. Somit konnten die Ultraschallmessungen zur hydraulischen Entwicklung unter Variation verschiedener praxisrelevanter Parameter noch nicht durchgeführt werden.

Generell werden die intrinsischen Variablen Frischbetontemperatur, Konsistenz und Luftporengehalt aus den Baustelleninformationen entnommen und nicht selbst gemessen. Die für den Transport und den nachfolgenden Einbau relevanten Parameter Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft wurden im Rahmen von zahlreichen Vorversuchen an Standardbetonen anhand der Messsysteme BEUS und FreshCon bereits mitgemessen. Die Verfahren ergänzen sich hinsichtlich der physikalischen Effekte, die für die Messung genutzt werden. Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurde sich gegen einen Druckbandsetzmesser entschieden, da der Fokus auf den Ultraschallmessungen liegt. Zudem wäre der zusätzliche Aufwand für den Druckbandsetzmesser im Verhältnis zum geringen Erkenntniszuwachs zu groß.

6.2.2 B2.2 - Entwicklung von Ultraschallmesstechnik zur Bestimmung der Betoneigenschaften

Die Prüfung mit Ultraschall gehört zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren. Das heißt, dass das Bauteil, welches geprüft wird, nicht beschädigt werden muss. Bei der Ultraschallmessung werden elastische Wellen in Form von Raum- oder Oberflächenwellen verwendet. Im Weiteren werden nur die Raumwellen betrachtet. Zu diesen Raumwellen gehören die P-Welle, die Kompressionswelle, und die S-Welle, auch Scherwelle genannt. Die Wellengeschwindigkeit hängt von den Einflussfaktoren Material, Temperatur und Messfrequenz ab, für erhärteten Beton liegt diese bspw. etwa bei 4000 m/s.

Zu den gültigen Regelwerken für die Ultraschallmessung gehören das Merkblatt B 04 der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) und die DIN EN 12504-4. Außerdem kann die RILEM-Richtlinie "Sonic methods for quality control of fresh cementitous materials" zur Ergänzung herangezogen werden.

Bei den etablierten Impuls-Echo- oder Durchschallungsverfahren zur Materialcharakterisierung wird die Wellengeschwindigkeit zur Bewertung verwendet. Dazu gehört auch die Messung mit FreshCon. Das Messgerät umfasst zwei Prüfgefäße, die mit Frischbeton gefüllt werden. In einem der beiden Prüfgefäße werden die P-Wellen (auch: Longitudinal- oder Primärwellen) und im anderen Prüfgefäß die S-Wellen (auch: Sekundär- oder Transversalwellen) gemessen. In regelmäßigen Abständen werden Ultraschallimpulse durch den Beton gesendet und daraus auf die Wellengeschwindigkeiten geschlossen. Aus den ermittelten Daten können Informationen unter anderem über die elastischen Materialparameter wie Elastizität, Viskosität, Rohdichte und Festigkeitsentwicklung gewonnen werden. Aus dem Verlauf der P-Welle kann mit dem als Erstarrungsende angenommenen Wert von 1500 m/s der optimale Bürstzeitpunkt bestimmt werden.





Abbildung 6-130: FreshCon Prüfgefäß und schematische Darstellung

Bei der Reflexion einer Ultraschallwelle an einer Grenzschicht wird ein Teil der Wellenenergie reflektiert, der andere Teil wird transmittiert. Die jeweiligen Anteile bestimmen sich aus dem Verhältnis der akustischen Impedanzen. Bei einer WRF-Messung (Wellenreflexionsverfahren) wird ein Zwischenmedium mit einer definierten akustischen Impedanz auf den Frischbeton gelegt und in dieses ein Ultraschallsignal gesendet. An der Grenzfläche wird das Signal teilweise reflektiert. Das reflektierte Signal kann am Ultraschallsensor wieder erfasst und ausgewertet werden. Während der Erstarrung und Erhärtung des Betons steigt dessen akustische Impedanz kontinuierlich an. Der Anteil der reflektierten Energie nimmt somit immer weiter ab. Zu einem bestimmten Zeitpunkt gleichen sich die Impedanz des Betons und des Zwischenmediums. Unter idealen Voraussetzungen wird dann die gesamte Welle transmittiert und keine Energie zurückgeworfen. Mit der weiteren Erhärtung steigt auch die Impedanz des Betons weiter an, wodurch auch der reflektierte Wellenanteil wieder ansteigt. Der Zeitpunkt der Impedanzgleiche ist somit das Minimum der reflektierten Energie im Zeitverlauf. Zudem stellt sich an diesem Zeitpunkt eine Phasenumkehr des Signals ein, welcher als binärer Informationsträger besonders geeignet ist, automatisch oder erfasst zu werden. Durch die Wahl geeigneter Zwischenmedien können daher in der Datenanalyse verschiedene Zeitpunkte im Erstarrungs- und Erhärtungsverlauf sehr einfach messtechnisch erfasst werden.

Im Projekt wurden verschiedene Zwischenmedien für ihre Eignung zur Bestimmung von Bürst- und Schnittzeitpunkt bestimmt und anhand ihrer Daten vielversprechende Exemplare experimentell untersucht (PMMA, PMMA XT, Messing, Aluminium, Magnesium, Borosilikatglas, Quarzglas). Das entwickelte Messgerät wurde für die Verwendung mit PMMA und Magnesium als Zwischenmedium optimiert.

Die Möglichkeiten zur Mitverfolgung der Festigkeitsentwicklung der Ultraschallsysteme BEUS und FreshCon sollten verwendet werden, um die optimalen Zeitpunkte für die Herstellung der Waschbetontextur und für die Fugenschnitte zu bestimmen. Die Kombination beider Verfahren ist hier möglich, um von den oberflächennahen Betoneigenschaften (BEUS) auf die volumetrischen, elastischen Materialeigenschaften (FreshCon) schließen zu können. Die Versuchsreihen mit FreshCon haben gezeigt, dass der Verlauf der P-Welle bei sehr steifem Beton mit diesem Verfahren nicht exakt genug ist, wodurch der E-Modul nicht als Bewertungsparameter herangezogen werden kann. Der Fokus der Untersuchungen mit FreshCon liegt daher auf der S-Welle. Für die Bewertung der Festigkeitsentwicklung anhand des Wellenreflexionsverfahrens hat sich die P-Welle in Labormessungen als besonders geeignet erwiesen. In den weiteren Versuchsreihen wurden die Vorteile der Nutzung der P-Welle für die Verfolgung des Erhärtungsfortschritts bestätigt. Das Messsystem wird daher für diese Wellenform optimiert. In Abbildung 6-131 ist die Übersicht der Konzeption zur Kombination aus beiden Geräten veranschaulicht. Abbildung 6-132 zeigt den daraus im Berichtszeitraum entwickelten Pulser-Receiver-Schaltplan, der der Platinenfertigung zugrunde liegt.



Abbildung 6-131: Blockschaltbild der möglichen Kombination aus BEUS und FreshCon



Abbildung 6-132: Pulser-Receiver-Schaltplan des entwickelten Messsystems

Berücksichtigt wurden dabei umfangreiche Labormessungen zur Auswahl und Optimierung der einzelnen Komponenten, um eine möglichst hohe Flexibilität während der Messung mit dem Prototyp bei gleichzeitig maximaler Reduktion der Komplexität der Hardware für intuitive Baustellenmessungen zu erreichen. Ebenso in die Entwicklung mit eingeflossen sind Versuche zur Sensorauswahl, zur Reduzierung des Energieverbrauchs, zur notwendigen Integrationsdauer der Einzelmessungen, zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und zur Optimierung der Signalform. Basierend auf den Messergebnissen an den optimierten Betonen können anhand dieser Entwicklung zukünftig deutliche Einsparungen im Umfang der Hardware erzielt werden sowie der Energieverbrauch im Hinblick auf eine idealerweise akkubetriebene Messeinheit optimiert werden. Eine Visualisierung der Messplatine ist in Abbildung 6-133 dargestellt.



Abbildung 6-133: Visualisierung der bestückten Messplatine

Der voll funktionsfähige Prototyp des Messgeräts nach Abschluss der Entwicklung ist in Abbildung 6-134 gezeigt. Das Ultraschall-Messgerät wird über den in der Kombination als optimal identifizierten Ultraschallsensor (Panametrics V601, 0,5 MHz, 1,0") und verschiedenen Zwischenmaterialien an die Betonfahrbahn angekoppelt. Das Messgerät sendet einen kurzen Ultraschallimpuls in das Zwischenmedium, und empfängt das am Übergang zum Beton reflektierte Signal. Der Fortschritt der Erstarrung und Erhärtung ergibt sich aus der Amplitude und der Phase des Signals. Beide Parameter werden über eine LED-Leiste quantitativ auf dem Messgerät angezeigt. Optional kann ein PC angeschlossen werden, um die zeitliche Entwicklung der Parameter per neu entwickelter Software (NI LabVIEW) aufzuzeichnen. Je nach ausgewähltem Zwischenmedium können die Zeitpunkte für Schneiden und Bürsten der Fahrbahn als Minimum der Signalamplitude nach der Phasenumkehr identifiziert werden.

Bei Anschluss eines PCs erfolgt die Spannungsversorgung über USB, andernfalls ist ein Netzteil notwendig. Zur späteren Optimierung nach Projektabschluss ist vorgesehen, die Hardware weiter zu reduzieren, um eine Spannungsversorgung per Batterie zu ermöglichen.

In der praktischen Anwendung werden direkt nach der Betonage an verschiedenen, fortlaufenden Stellen auf der Fahrbahn Blöcke (ca. 50x50x25 mm) der ausgewählten Zwischenmedien für Bürsten und Schneiden platziert. An diesen Stellen müssen in regelmäßigen Abständen die Parameter geprüft werden. Ein Verbleib des Messgeräts an den Messstellen für die Dauer der Messung ist nicht notwendig.



Abbildung 6-134: Funktionsfähiges Messgerät im Showcase-Gehäuse, mit Ultraschallsensor Panametrics V601

Im letzten Projektabschnitt, durch die Messungen am Demonstrator und im Experimentalprüfstand, hat sich gezeigt, dass eine kombinierte Herangehensweise aus einer dauerhaften lokalen Messung mit dem WRF-Verfahren zusammen mit räumlich verteilten Temperaturmessungen besser geeignet für den Einsatz in der Praxis sein könnte. Dabei wird am jeweiligen Tagesansatz das entwickelte WRF-Messsystem installiert, mit dem kontinuierlich die Festigkeitsentwicklung des Betons verfolgt wird. Der Vorteil im Vergleich zu verteilten, punktuellen Einzelmessungen liegt darin, dass Messkurven mit einer hohen Anzahl an Einzelwerten entstehen, die einer teilautomatischen Auswertung hinsichtlich den optimalen Zeitpunkten für Bürsten und Schneiden deutlich einfacher zugänglich sind. Zudem sind der Einfluss einer wiederholten Ankopplung und die Notwendigkeit manueller Interaktionen minimiert. Zeitgleich wird an dieser Ausgangsmessstelle fortlaufen die Temperatur des Frischbetons erfasst und daraus eine Reifekurve bestimmt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Reifemethode nach de Vree wird jedoch keine Kalibrierkurve mit der Betondruckfestigkeit notwendig, sondern ausschließlich die jeweilige Reife den ermittelten WRF-Werten zum Bürst- und Schnittzeitpunkt zugeordnet. Über die Tagesleistung verteilt können Frischbetontemperaturen mit etablierter, günstiger Messtechnik aufgezeichnet und die lokale Reife berechnet werden. Entsprechend den am Tagesansatz bestimmten Bearbeitungszeitpunkten und ihren Reifewerten können diese direkt auf die Strecke übertragen werden. Die Einflüsse aus Temperaturunterschieden und Temperaturwechseln sind in beiden Messverfahren gleichermaßen enthalten.



Abbildung 6-135: Vergleich verschiedener Koppelmittel für die Optimierung des Energieübertrags zwischen Ultra schallsensor und Zwischenmedium. Abschnitt 1: Wasser, Abschnitt 2: Echotrace, Abschnitt 3: Baysilone, Abschnitt 4: Schalöl.

Für die Ankopplung des Ultraschallsensors ist es bei jeder Messung erforderlich, einen Tropfen Schalöl auf das Zwischenmedium zu geben, um eine reproduzierbare Messung zu erhalten. Schalöl hat sich dabei im Vergleich zu Wasser, Echotrace und Baysilone-Paste als am besten geeignet herausgestellt, da damit eine konstant hohe Energieübertragung bei stabiler Ankopplung (Verrutschen/ Abheben) erzielt werden kann. Für kurzzeitige Messungen kann Wasser als Koppelmittel verwendet werden (Abbildung 6-135, Abschnitt 1). Mit den viskosen Koppelmitteln konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden (Abbildung 6-135, Abschnitte 2 und 3).



Abbildung 6-136: Entwicklung der Wellenreflexionsamplitude zwischen Magnesium (20mm) und Fahrbahnbeton bei ca. 20°C. Die Flan-kenumkehr wurde nach ca. 11 Stunden registriert, das Amplitudenminimum nach ca. 15 Stunden.



Abbildung 6-137: Entwicklung der Wellenreflexionsamplitude zwischen PMMA (14,6 mm) und Fahrbahnbeton bei ca. 20°C. Die Flankenum-kehr wurde nach ca. 3,5 Stunden registriert, das Amplitudenminimum nach ca. 4 Stunden

In Abbildung 6-136 und Abbildung 6-137 ist die zeitliche Entwicklung der Wellenreflexionsamplitude zwischen PMMA und Beton (Schneiden) und zwischen Magnesium und Beton (Bürsten) gezeigt. Die klimatischen Umgebungsbedingungen während des Versuchs lagen bei etwa 20 °C und 35 % relativer Feuchte. Bei der Messung mit Magnesium wurde durchgehend eine geringe Signalamplitude registriert. Das Minimum nach ca. 15 Stunden ist dennoch gut erkennbar. Die Flankenumkehr wurde nach ca. 11 Stunden registriert. Bei der Messung mit PMMA wurden Flankenumkehr und Amplitudenminimum nach 3,5 bzw. 4 Stunden aufgezeichnet. Der Sprung in den Messdaten bei etwa 2,5 Stunden ist auf eine Nachdosierung des Koppelmittels zurückzuführen und für die Dateninterpretation nicht relevant.

6.2.3 B2.3 - Mechanische Prüfungen zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften der optimierten Betone

Die Mechanischen Prüfungen zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften wurden von der MPA Universität Stuttgart durchgeführt. Ausführliche Informationen finden sich in Abschnitt 5.2.1.

6.2.4 B2.4 - Bau eines Experimentalprüfstands an der MPA Stuttgart zur experimentellen Nachbearbeitung der Betonoberfläche durch Bürsten und Schneiden

Ein wichtiger Bestandteil des Projekts war die Übertragung bzw. Hochskalierung von Methoden im Labor- bzw. Technikumsmaßstab auf den Betonstraßenbau. Ein maßstäblicher Bezug zum Betonstraßenbau ist jedoch erst dann möglich, wenn im Technikumsmaßstab vergleichbare Materialien, Konstruktionen und Prozesse nachgebildet und damit reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können. In Ergänzung zur maßstabsgetreuen und reproduzierbaren Herstellung von Fahrbahnbetonen in der Liebherr Mischanlage am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) wurde dazu ein Experimentalprüfstand an der Universität Stuttgart entwickelt und aufgebaut. Mit beiden Anlagen können damit praxisrelevante Untersuchungen unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette umgesetzt werden. Diese umfassen neben der Entwicklung und Analyse anforderungsgerechter Betone unter Anwendung rheologiebasierter Mischprozessführung auch einen annähernd vergleichbaren Einbau des Betons mit vielfältigen optionalen Möglichkeiten zum Eintrag der Verdichtungsenergie und der Berücksichtigung heute im Betonstraßenbau üblicher Nachbearbeitungsprozesse.

Der entwickelte Experimentalprüfstand stellt den maßstäblichen Bezug und somit die scale-up Basis zum Gleitschalungsfertiger her. Der Prüfstand besteht aus einem 3D-Schwerlastportal mit Getriebe für Servomotoren der Firma Winkel, Servomotoren und Ansteuerung für die Verfahrachsen der Firma Festo, einer Offset-Gleitschalung mit Rüttlern der Firma Wirtgen sowie einem Anbausatz zum Schneiden von der Firma Lissmac. Für die Sachspenden in diesem Zusammenhang bedanken wir uns bei den genannten Firmen recht herzlich.

Das Schwerlastportal wurde gemäß den folgenden Parametern ausgelegt:

- Verfahrweg: 700 x 1800 x 5500 mm → Gesamtlänge: 2300 x 5800 x 7500 mm
- Verfahrgeschwindigkeit: max. 0,5 m/s (Beschleunigung 0,5 m/s²) in x, y und 0,2 m/s in z-Richtung
- Wiederholgenauigkeit +/- 1 mm
- Betriebstemperatur: 5-45 °C
- Lastaufnahmemittel: Greifer bauseitig, Lastschwerpunkt ca. 300 mm
- Sonderflanschplatte zur Aufnahme der Offset-Gleitschalung und Nachbearbeitungswerkzeuge

Abbildung 6-138 zeigt die Konstruktionsskizze und Abbildung 6-139 den aufgebauten Experimentalprüfstand. Als Witterungsschutz wurde eine Dachkonstruktion in Holzbauweise vorgesehen. Arbeitsschwerpunkt B – Schlüsselinnovationen für prozesssichere Teilschritte





Abbildung 6-138: Konstruktionsskizze.



Abbildung 6-139: Experimentalprüfstand.

Mittels Festo Servomotoren mit einer Leistung von 6,88 kW und 5,11 kW wird der Experimentalprüfstand angetrieben. Für die Ansteuerung der Antriebe wird eine Bachmann-SPS genutzt. Zur realitätsnahen Fertigung eines Betonstreifens steht eine Offset-Gleitschalung der Firma Wirtgen zur Verfügung (Abbildung 6-140, linkes Bild). Diese entspricht in sehr vereinfachter Weise einem realen Gleitschalungsfertiger. Die am Portal installierte Offset-Gleitschalung fertigt 0,97 m breite, 5,50 m lange und bis zu 320 mm dicke Betonstreifen. Montierte Innenrüttler an der Gleitschalung, welche über einen Frequenzumwandler stufenlos angesteuert werden können (max. 12.000 U/min), sorgen für eine vollständige Verdichtung des eingebrachten Betons (Abbildung 6-140, rechtes Bild).





Abbildung 6-140: Offset-Gleitschalung (links) und gewählte Anordnung der Innenrüttler (rechts).

Zum Herstellen von Kerbfugen und Trennschnitten wurde eine Aufnahme zum Schneiden vorgesehen. Das Schneidewerkzeug wurde anhand der Anforderungen an maximale Schnitttiefe, Sägeblattdurchmesser, Umfangsgeschwindigkeit und der Drehzahl des Sägeblatts von der Firma Lissmac konstruiert und zur Verfügung gestellt. Perspektivisch sind auch Aufnahmen für Bürst- und Grindingwerkzeuge vorgesehen.

Baustellenseitig erfolgt die Befüllung der Offset-Gleitschalung kontinuierlich, um den Füllstand in der Schalung konstant zu halten. Der sich dadurch einstellende hydrostatische Druck ermöglicht in Kombination mit den verwendeten Rüttelflaschen eine gleichbleibende Verdichtung und einen Deckenschluss über die Gesamtlänge des Betonstreifens. Diese Art der Befüllung konnte bisher nicht realisiert werden. Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen erfolgte die Befüllung diskontinuierlich über Big Bags.

Das Glätten der Oberfläche, die Nachbehandlung und das Bürsten und Schneiden erfolgten händisch, entsprechend der Ausführung bei Kleinfeldern in der Baupraxis.



Abbildung 6-141: Hergestellter Betonstreifen (links) und Texturierung mittels Besenstrich (rechts).

Am Experimentalprüfstand wurden drei Versuche durchgeführt, wobei der erste Versuch im Wesentlichen der Überprüfung der grundsätzlichen Funktion der Anlage und der Arbeitsabläufe diente. In zwei weiteren Versuchen wurde der Fokus auf den Nachweis der Vergleichbarkeit mit realen Betonfahrbahnen, die Optimierung des Prüfstands und die Bestimmung der Bürst- und Schnittzeitpunkte sowie der abschließenden Erprobung des entwickelten WRF-Messgeräts gelegt.

Im ersten Versuch wurde ein 320 mm dicker Betonstreifen einschichtig/einlagig ausgeführt (Abbildung 6-141, linkes Bild). Die Betonzusammensetzung des untersuchten Betonstreifens ist in Tabelle 6.32 zusammengestellt. Die Oberfläche des Betonstreifens wurde mit einem Besenstrich versehen (Abbildung 6-141, rechtes Bild).

Tabelle 6.32: Betonzusammensetzung.

Baustelle	Experimentalprüfstand
Bauweise	einschichtig/einlagig
Typ	Ober-/Unterbeton 0/22
Festigkeitsklasse	C35/45
Konsistenz	C1
Zement	CEM III/A 42,5 N
Zementgehalt	360 kg/m ³
w/z _(eq.)	0,42
Frischbetonluftgehalt	4,5 Vol%
Gesteinskörnung	
Sand 0/2	30 Vol%
Basalt-Split 2/8	15 Vol%
Basalt-Split 8/16	25 Vol%
Basalt-Split 16/22	30 Vol%

Die Außentemperatur während der Betonage betrug etwa 20 °C bei sonnigem Wetter. Im Tagesverlauf wurde ein Temperaturbereich zwischen 17 °C und 24 °C aufgezeichnet.

Zwei Tage nach der Herstellung wurde der Betonstreifen zurückgebaut. Dabei wurden zwei größere Betonteile mit den Abmessungen von rd. 1,00 m x 1,00 m für weitere Untersuchungen ausgebaut. Der restliche Betonstreifen wurde entsorgt. Ziel der Untersuchungen war es die Einbauqualität visuell und über die Ermittlung mechanischer Betoneigenschaften nachzuweisen.

Ein Betonteil wurde in der Art aufgesägt werden, um den Einfluss der Verdichtungswirkung der drei angeordneten Innenrüttler (vgl. Abbildung 6-140, rechtes Bild) auf mögliche Entmischungen und Verteilung der Gesteinskörnung (Packungsdichte) hin visuell sichtbar zu machen. Dabei wurden Trennschnitte sowohl quer als auch längs zur Betonierrichtung ausgeführt, wobei Längsschnitte u.a. im Bereich der Rüttelflaschen erfolgten.

Die Schnittflächen in Abbildung 6-142 und Abbildung 6-143 (linkes Bild) verdeutlichen, dass die gewählte Anordnung der drei Innenrüttler zu Entmischungen führen kann. Diese Entmischung wird oftmals auch bei real hergestellten Fahrbahndeckenbetonen angetroffen (Abbildung 6-143, rechtes Bild). Während sich beim Betonstreifen im Experimentalprüfstand an der Oberfläche hauptsächlich feinere Gesteinskörnung anreichert (Abbildung 6-142), findet man beim realen Fahrbahndeckenbeton gleichmäßig verteilte feinere und gröbere Gesteinskörnung vor, was vor allem beim Texturgrinding eine wichtige Rolle spielt. Zur Vermeidung von Entmischungen und Anreicherungen feiner Gesteinskörnungen an der Betonoberfläche muss daher zukünftig die Anordnung der Rüttelflaschen, die Verdichtungsenergie sowie die Vorschubgeschwindigkeit der Offset-Gleitschalung aufeinander abgestimmt werden.



Abbildung 6-142: Anordnung der Längs- und Querschnitte.



Abbildung 6-143: Sägeschnitt quer zur Betonierrichtung



Abbildung 6-144: Einfluss der Anordnung der Rüttelflaschen auf die Verteilung der Gesteinskörnung längs zur Betonierrichtung bei Sägeschnitt 5 links (linkes Bild) und 6 links (mittleres Bild) im Vergleich zu einem real hergestellten Fahrbahndeckenbeton (rechtes Bild)

Am zweiten Betonteil wurde die Rohdichte und die mechanischen Betoneigenschaften (dyn. E-Modul, statischer E-Modul, zentrische Zugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Druckfestigkeit) ermittelt. Es galt nachzuweisen, ob mit dem Experimentalprüfstand im Vergleich zu real hergestellten Fahrbahndeckenbetonen reproduzierbare mechanische Betoneigenschaften erzielt werden können.

Zur Beantwortung dieser Frage, wurden in Längsrichtung an fünf unterschiedlichen Stellen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm herausgearbeitet (Abbildung 6-145). Bei den Positionen 1, 3, und 5 waren während der Herstellung die Rüttelflaschen angeordnet. Die Positionen 2 und 4 sind Bereiche außerhalb der Rüttelflaschen.



Abbildung 6-145: Anordnung der Bohrkerne zur Ermittlung von mechanischen Betoneigenschaften.

Die mittlere Rohdichte (n = 25) wurde zu 2,49 kg/dm³ bestimmt. Die Druckfestigkeit bei Position 5, ermittelt an jeweils fünf Prüfkörpern aus der oberen und unteren Randfaser, betrug 48,0 MPa. Tabelle 6.33 und Tabelle 6.34 fassen die Ergebnisse der mechanischen Betoneigenschaften (dyn. E-Modul, stat. E-Modul, zentrische Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit an der unteren Randfaser) unter Angabe von Position, Mittelwert, Standardabweichung Variation und Anzahl der Prüfkörper zusammen.

Gemittelt über alle Messergebnisse (n = 25) entspricht der statische E-Modul rd. 92 % des dynamischen E-Moduls. Unterteilt in die verschiedenen Positionen liegen die Variationskoeffizienten deutlich unter 5 %. Der Variationskoeffizient aller 25 Spaltzugergebnisse, ermittelt an der unteren Randfaser, beträgt 7,9 %. Innerhalb der verschiedenen Positionen schwanken die Spaltzugergebnisse, was durch die Variationskoeffizienten von 3,2 bis 9,7 % verdeutlicht wird. Im Gegensatz dazu schwanken die Messergebnisse der zentrisch ermittelten Zugfestigkeiten noch stärker. Mit 3,9 MPa wurde bei Position 3 (mittlere Rüttelgasse) die größte Zugfestigkeit ermittelt, am Rand bei Position 1 (äußere Rüttelgasse) mit 2,7 die geringste Zugfestigkeit. Der Variationskoeffizient aller 20 Zugfestigkeitsergebnisse liegt daher bei 16,5 %. Die Zugfestigkeitsergebnisse lassen vermuten, dass in den Beton im Bereich der mittleren Rüttelgasse zusätzliche Verdichtungsenergie durch die äußeren Rüttelflaschen eingeführt wurde und dadurch die Zugfestigkeiten in diesem Bereich am höchsten sind. Zur Bestätigung dieser Vermutung sind perspektivisch weitere Versuche notwendig. Tabelle 6.33: Auswertung des dynamischen und statischen E-Moduls unter Angabe von Position, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).

Position	dyn. E-Modul				stat. E-Modul			
	MW [MPa]	Stabw. [MPa]	Var. [%]	n [-]	MW [MPa]	Stabw. [MPa]	Var. [%]	n [-]
Position 1 Rüttelgasse	44.300	0,4	0,85	5	41.200	1,8	4,5	5
Position 2	44.100	0,3	0,72	5	40.900	0,9	2,1	5
Position 3 Rüttelgasse	44.100	0,5	1,14	5	41.000	1,0	2,4	5
Position 4	43.200	0,9	1,99	5	39.800	0,8	2,0	5
Position 5 Rüttelgasse	43.600	0,3	0,66	5	40.800	0,7	1,8	5

Tabelle 6.34: Auswertung der Zug- und Spaltzugfestigkeit (untere Randfaser) unter Angabe von Position, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).

	Zugfestigkeit				Spaltzugfestigkeit, untere Randfaser			
Position	MW [MPa]	Stabw. [MPa]	Var. [%]	n [-]	MW [MPa]	Stabw. [MPa]	Var. [%]	n [-]
Position 1 Rüttelgasse	2,7	0,2	5,4	5	4,7	0,3	7,0	5
Position 2	2,8	0,1	4,2	5	4,8	0,5	9,7	5
Position 3 Rüttelgasse	3,9	0,3	7,5	5	5,1	0,4	6,8	5
Position 4	3,4	0,3	8,2	5	5,3	0,2	3,2	5
Position 5 Rüttelgasse	Proben für Druckfestigkeit			5	5,1	0,3	5,6	5

Aus den bisher erzielten Ergebnissen lassen sich für den Experimentalprüfstand folgende Folgerungen ableiten:

- Das diskontinuierliche Befüllen der Offset-Gleitschalung mit Big Bags führt bisher zu veränderlichen hydrostatischen Druckverhältnissen, welche sich u. U. negativ auf die Verdichtung des Betons auswirken können.
- Anzahl und Anordnung der Rüttelflaschen sowie Rüttelenergie und Vorschubgeschwindigkeit der Offset-Gleitschalung müssen beim Betoneinbau so aufeinander abgestimmt werden, dass Entmischungen im Beton selbst vermieden werden.
- Die ersten beiden Spiegelstriche lassen vermuten, dass ein maßstäblicher Bezug zum Gleitschalungsfertiger bisher noch nicht ausreichend hergestellt werden konnte.
- Im Vergleich zur Druckfestigkeit, dem statischen E-Modul und der Spaltzugfestigkeit streuen die Ergebnisse zur zentrischen Zugfestigkeit deutlich mehr. Die Ursache ist vermutlich in der Anzahl und Anordnung der Rüttelflaschen begründet.

Im beschriebenen Versuch wurden nach der Betonage Zwischenmedien aus PMMA und Magnesium auf den Beton aufgesetzt, um nachfolgend WRF-Messungen mit dem optimalen Schnittzeitpunkt korrelieren zu können. Zur Bestimmung dieses Zeitpunkts wurden in regelmäßigen Abständen Sägeschnitte in den Beton eingebracht und diese anhand des Kornausbruchs bewertet. Zur Korrelation der Ergebnisse mit der Frühfestigkeit des Betons wurden neun Betonwürfel angefertigt. Außerdem wurde der Erstarrungs- und Erhärtungsverlauf mit dem FreshCon-System verfolgt. Ergänzend wurden Messungen der Betonhärte mit einem Schmidthammer für jungen Beton (Proceq Schmidthammer LR) durchgeführt. Da damit erst nach über 24 Stunden reproduzierbare Rückprallwerte erzielt werden konnten, werden diese Versuche hier nicht weiter betrachtet.

In Abbildung 6-146 ist der Unterschied zwischen dem ersten Schnitt und einem der letzten Schnitte zu erkennen. Hierzu wurden die Fugen nach dem Aushärten des Betons aufgeschnitten, um die Schnittflächen sichtbar und somit für eine Analyse zugänglich zu machen. Die obere Hälfe des Querschnitts entspricht damit jeweils dem ursprünglichen Schnitt; in der unteren Hälfte ist der nach der Aushärtung auseinandergebrochene Beton zu sehen.

Abbildung 6-146 zeigt zur Veranschaulichung links einen willentlich deutlich zu früh angefertigten Schnitt, bei dem klar sichtbar ist, dass der Zement bei der mechanischen Bearbeitung aus der Matrix herausgerissen bzw. ausgespült wurde. Rechts ist ein optimaler Schnitt zu erkennen, bei dem sich bereits eine feste Zementmatrix gebildet hatte. Übertragen auf die Baupraxis lässt sich dieses Vorgehen nur bedingt, da dort die Bewertung anhand der Kornausbrüche an der Oberfläche vorgenommen werden muss. Während des Versuchs wurde diese Beurteilung vom Projektpartner OAT vorgenommen.



Abbildung 6-146: links: Erster, deutlich zu früher Schnitt; rechts: Ein später Schnitt mit glatter Schnittkante

Im Rahmen dieser Versuchsdurchführung konnte der optimale Schnittzeitpunkt nur anhand der Messdaten extrapoliert werden, da dieser erst nach dem neunten Schnitt lag. Durch die Nähe des Experimentalprüfstandes zu einem Wohngebiet durfte nach 22:00 Uhr nicht weiter geschnitten werden (Lärmschutz).

In Abbildung 6-147 und Abbildung 6-149 sind die Ergebnisse der WRF-Messung als Entwicklung des WRF-Werts über die Zeit bzw. des Alters der Probe dargestellt Die schwarzen Linien entsprechen den WRF-Werten für PMMA bzw. Magnesium am Experimentalprüfstand, jeweils ergänzt um die Standardabweichung der Einzelmessungen. Die rote Kurve zeigt eine Vergleichsmessung mit PMMA an den Würfeln zur Druckfestigkeitsprüfung, um festzustellen, ob die Messung an einem Ersatzprobekörper möglich ist. Die vertikale grüne Linie gibt den theoretisch optimalen Bürstzeitpunkt an, entsprechend einer P-Wellengeschwindigkeit von 1500 m/s in den FreshCon-Messungen (Abbildung 6-148). Bei der verwendeten Rezeptur handelt es sich nicht um eine Waschbetonrezeptur, daher ist in diesem Versuch die Angabe dieses Zeitpunkts ausschließlich theoretischer Natur. Die vertikale rote Linie zeigt den theoretisch optimalen Schnittzeitpunkt, berechnet als extrapoliertes Minimum der WRF-Kurve. Der messtechnisch ermittelte Schnittzeitpunkt deckt sich mit der Annahme, dass dieser bei Erreichen einer Würfeldruckfestigkeit von ca. 5 N/mm² ausgeführt werden muss (Abbildung 6-149).

Beide Verläufe zeichnen sich im Versuch durch eine hohe Reproduzierbarkeit (kleine Standardabweichung) aus. Eine wiederholte Messung an verschiedenen Standorten, d.h. bei über die Fahrbahnlänge verteilten Reflektorplatten, ist damit umsetzbar.


Abbildung 6-147: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium PMMA; schwarz: Mittelwert der PMMA Messdaten mit Standardabweichungsbalken auf der Fahrbahnoberfläche, rot: PMMA-Messwerte vom Druckwürfel, grün: theoretischer Bürstzeitpunkt (bei dieser Betonrezeptur nicht zurteffend).



Abbildung 6-148: Entwicklung der P-Wellengeschwindigkeit im FreshCon-System. Erstarrungsende bei ca. 1500 m/s, entsprechend 240 Minuten.



Abbildung 6-149: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium Magnesium; schwarz: Mittelwert der Messdaten mit Standardabweichungsbalken; rot: theoretischer Schnittzeitpunkt.



Abbildung 6-150: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit des Betons. Der Schnittzeitpunkt nach 17 Stunden entspricht einer Würfeldruckfestigkeit von ca. 5 N/mm².

In einem zweiten Versuch wurde ein 320 mm dicker Betonstreifen einschichtig/einlagig ausgeführt. Die Betonzusammensetzung des untersuchten Betonstreifens entspricht einer üblichen Oberbetonrezeptur für die Herstellung einer Waschbetonoberfläche. Tabelle 6.35: Betonzusammensetzung für den zweiten Versuch.

Baustelle	Experimentalprüfstand		
Bauweise	einschichtig/einlagig		
Гур	Waschbeton 0/8		
Festigkeitsklasse	C30/37		
Konsistenz	C1		
Zement	CEM I 42,5 N		
Zementgehalt	420 kg/m ³		
N/Z(eq.)	0,43		
Frischbetonluftgehalt	6,5 Vol%		
Gesteinskörnung			
Sand 0/2	35 Vol%		
Basalt-Split 2/8	65 Vol%		

Die ausgeführte Fahrbahnstärke von 320 mm ist für die verwendete Waschbetonzusammensetzung sehr hoch. Mit dem derzeitigen Aufbau am Experimentalprüfstand ist die Herstellung dünnerer Betonplatten noch nicht möglich. Da der Fokus der zweiten Versuchsreihe auf der Bestimmung des optimalen Bürstzeitpunkts lag, wurde die hohe Plattenstärke nicht als wesentlicher Einflussfaktor erachtet.

Die Außentemperatur während der Betonage betrug etwa 10 °C bei bewölktem Himmel. Im Tagesverlauf wurde ein vorübergehender Temperaturanstieg auf bis zu 13 °C aufgezeichnet.

Nach der Betonage wurden ein Nachbehandlungsmittel aufgetragen und Zwischenmedien aus PMMA auf den Beton aufgesetzt, um nachfolgend WRF-Messungen mit dem optimalen Bürstzeitpunkt korrelieren zu können. Zur Bestimmung dieses Zeitpunkts wurden in regelmäßigen Abständen händische Probebürstungen mit einem Stahlborstenbesen durchgeführt und diese anhand des Kornausbruchs, der Texturtiefe (Sollwert ca. 0,9 bis 1 mm) und der Gleichmäßigkeit der Textur bewertet. Das Bürsten wurde am Experimentalprüfstand vom Projektpartner OAT durchgeführt.



Abbildung 6-151: Probebürstungen von links oben nach rechts unten mit zunehmenden Betonalter. Der optimale Bürstzeitpunkt wurde nach 15,5 Stunden erreicht (grün markiert).

Die hergestellten Waschbetontexturen sind in Abbildung 6-151 dargestellt. Durch die niedrige Außentemperatur konnten die Bürstversuche erst ca. 9 Stunden nach dem Betonieren sinnvoll beginnen. Bei den ersten Probebürstungen konnten große Ausbrüche in der Oberfläche festgestellt werden. Von Hand konnten weitere Steine herausgebrochen werden. Erst beim dritten Probebürsten, nach etwa 12 Stunden, wurden diese Ausbrüche aus der Oberfläche geringer. Es ließen sich aber immer noch von Hand Steine aus der Oberfläche herauslösen. Erst beim sechsten Probebürsten nach 14 Stunden ließen sich keine Steine mehr händisch aus der Oberfläche lösen. Anhand der Ausbrüche aus der Oberfläche sowie mit den Ergebnissen eines ELA-Textur-Messgeräts konnte der optimale Bürstzeitpunkt nach 15,5 mit dem neunten Probebürsten bestimmt werden. Die Texturtiefe befand sich 1,07 mm im optimalen Bereich. Die Oberflächentextur bei diesem Bürstzeitpunkt war sehr homogen im Vergleich mit den frühen Probebürstungen. Die nachfolgenden Probebürstungen führten zu keiner Verbesserung in der Bewertung.



Abbildung 6-152: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium PMMA; grün: theoretischer Bürstzeitpunkt; roter Bereich: Reflexion mit negativer Phase; blau: Reflexion mit positiver Phase.

Die WRF-Messungen wurden ausschließlich mit dem Zwischenmedium PMMA zur Ermittlung des optimalen Bürstzeitpunkts gemessen (Abbildung 6-153). Das Minimum der Kurve wurde nach etwa 23,5 Stunden erreicht. Abweichend davon lag der Zeitpunkt der Phasenumkehr bereits bei 15,5 Stunden und damit exakt an der Stelle des optimalen Bürstzeitpunkts. Aus den zeitgleich durchgeführten Temperaturmessungen kann die Reife am Bürstzeitpunkt errechnet und auf eine entfernte Messstelle übertragen werden, an der ausschließlich die Temperatur aufgezeichnet wird. Das Vorgehen ist exemplarisch in Abbildung 6-153 gezeigt. Alternativ kann, sofern eine entsprechende Kalibrierkurve vorhanden ist, auf die Würfeldruckfestigkeit geschlossen werden (Abbildung 6-154). Für die Übertragung des Schnittzeitpunkts gelten die Überlegungen analog.



Abbildung 6-153: Nomogramm zur Übertragung des optimalen Bürstzeitpunkts auf eine entfernte Messstelle auf Grundlage einer einzelnen, kontinuierlichen WRF- und Reifemessung (linke Reifekurve) und verteilten Temperaturmessungen (rechte, exemplarische Reifekurve).



Abbildung 6-154: Nomogramm zur Ableitung der Druckfestigkeit des Betons zum optimalen Bürstzeitpunkt. Daten aus der zweiten Versuchsreihe.

6.3 ARBEITSPAKET B3 – INTEGRATIVE QUALITÄTSKONTROLLE

Mit steigenden Belastungen der Fahrbahnen werden höhere Anforderungen an die fertigen Oberflächen gestellt. Um zielgerichtet in den Herstellungsprozess einzugreifen, müssen Qualitätsmerkmale wie Oberflächentextur und Struktur während des gesamten Herstellungsprozesses systematisch überwacht werden. Hierzu sind innovative Messtechniken zur Detektion der prozessrelevanten Parameter zu entwickeln, respektive alle qualitätsbeeinflussenden Aspekte vom Unterbau bis hin zur bearbeitenden Fahrbahnoberfläche quantitativ zu erfassen

6.3.1 B3.1 - Erstellung 3-D-Modell der Fahrbahn

Die Fragestellung, die mit der dreidimensionalen Erfassung und Analyse der Unterlage adressiert wird, ist, ob Unebenheiten der Unterlage einen Einfluss auf die Ebenheit der Decke haben. Wenn die Aufnahmen von Unterlage und Decke räumlich synchronisiert vorliegen, besteht außerdem die Möglichkeit, die Einbaustärke flächendeckend zu qualifizieren. Mit klassischen Methoden ist dies nur stichprobenartig möglich.

Die dreidimensionale laserbasierte Vermessung der Unterlage vor Einbau der Betondecke unterscheidet sich von der Durchführung der Messung, wie auch der weiterführenden Datenverarbeitung, nicht von der Aufnahme und Verarbeitung fertiger Fahrbahndeckendaten, die in Kapitel 5.1.6 und den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben ist.

Aus logistischen Gründen konnte die Unterlage im Zuge der Baustellendokumentation nicht für alle untersuchten Baustellen aufgenommen werden. Im Folgenden sind die Baustellen aufgelistet, bei denen die Aufnahme der Unterlage stattfand:

- A61 Dieblich I am 25.09.2017
- Flughafen Köln Wahn am 11.06.2018
- A1 Wittlich II am 17.09.2019



Approximierte Schichtdicke



Abbildung 6-155: Prinzip der Differenzbildung von Unterlage-Scan und Decke-Scan zur Approximation der Einbaustärke.

6.3.2 B3.2 - Konzeption & Umsetzung innovativer Messtechnik für Ebenheit an Prüfstandsschlitten

Essentiell für die Bestimmung der Ebenheit ist die Rekonstruktion des tatsächlichen Oberflächenprofils. Ziel ist es, dieses Profil berührungslos bestimmen zu können. Hierfür wurden verschiedene Konzepte verfolgt und erste Versuche durchgeführt.

Nach aktuellem Stand wird die Ebenheit für 4 Meter lange Profilaufnahmen bestimmt. Es ist also notwendig, Oberflächenlinien dieser Länge reproduzieren zu können. Dies ist zum einen möglich, indem sich direkt eine 4 Meter Momentaufnahme aufzeichnen lässt, oder aber durch das Abtasten von Teilstücken.

Beim Aufzeichnen von Teilstücken ist es des Weiteren möglich, dass das Messinstrument direkt im Koordinatensystem der Straße misst, oder aber indirekt in einem globalen System, in dem die Bewegung herauszurechnen ist.

Es wurden vier Konzepte ausgewählt, die in einem Versuch auf dem Gelände der Wirtgen GmbH getestet wurden. Die folgenden Konzepte wurden dafür ausgewählt:

- Schlitten: Mittels 4 m langer Richtlatte und einem mittig angebrachten 1D-Abstandslaser wurde eine Art Planograf verwirklicht, der direkt über den Frischbeton gezogen wurde.
- Abstands- und Neigungssensoren: Es wurde eine starre Konstruktion vorgesehen, an der ein zweiachsiger-Neigungssensor sowie zwei 1D-Abstandssensoren angebracht wurden.
- Abstandssensoren: Es wurde ein vorhandener Messbalken, der 16 1D-Abstandssensoren beinhaltet, angebracht.
- Linienlaser: Es liegt ein Linienlaser, der eine Linienlänge von etwa 1 m aufzeichnet, vor, der stellvertretend für den vorgesehenen Linienlaser getestet wurde.



Die folgende Abbildung 6-156 zeigt eine Skizze des Aufbaus am Gleitschalungsfertiger:

Abbildung 6-156: Anbauskizze der Konzepte am Gleitschalungsfertiger.



Den realen Aufbau beim Einbauversuch zeigt die nachfolgende Abbildung 6-157:

Abbildung 6-157: Versuchsaufbau.

Der **Schlitten** hinterließ, wie in Abbildung 6-158 links zu erkennen ist, eine deutliche Spur im Frischbeton. Auch wird bei diesem Konzept dem Linienlaser durch den Beton zugesetzt (vgl. Abbildung 6-158 rechts). Damit musste dieses Konzept verworfen werden.



Abbildung 6-158: Spur des Schlittens im Frischbeton (links) und zugesetzter Abstandssensor (rechts).

Das Konzept Abstandssensoren mit Neigungssensor musste aufgrund einer durchgeführten Patentrecherche ausgeschlossen werden.

Abbildung 6-159 zeigt die Aufzeichnung des Versuchs durch mehrere hintereinander angebrachte **Abstands**sensoren.



Abbildung 6-159: Messdaten des Konzeptes mehrerer Punktlaser.

Wie zu erkennen ist, zeigen die unterschiedlichen Signale phasenverschobene, ähnliche Oberflächenprofile. Es scheint damit möglich zu sein, einen Algorithmus zu entwickeln, mit dem sich die Oberfläche reproduzieren lässt.

Der **Linienlaser** konnte auf der stark reflektierenden Oberfläche keine plausiblen Messungen aufzeichnen. Da das Konzept dennoch als vielversprechend scheint, wurde für das Konzept ein Linienlaser entwickelt, mit dem sich solche reflektierenden Oberflächen vermessen lassen. Dieser neu entwickelte Scanner ist in der folgenden Abbildung 6-160 dargestellt:



Abbildung 6-160: Aufbau des ersten Sensortests des Linienscanners.

Erste Tests mit diesem Gerät erweisen sich als vielversprechend. Es wurden mit Wasser stark benetzte Oberflächen ohne Reflexionen aufgezeichnet.

Zusammenfassend werden die Konzepte **Abstandssensoren** und **Linienlaser** weiterverfolgt. Diese werden nun in der Folge beschrieben:

Abstandssensoren

Konzept 1 arbeitet mit mehreren 1D-Abstandssensoren. Jeder Oberflächenpunkt wird nacheinander von den Sensoren gescannt. Hier scheint es möglich zu sein, die Bewegungsstörgrößen zu bestimmen und damit das Oberflächenprofil zu reproduzieren. Eine Übersicht über das Konzept gibt die folgende Abbildung 6-161:



Abbildung 6-161: Skizze des Sensorkonzeptes 1D-Abstandslaser.

Es konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der in der Simulation ein vorgegebenes Oberflächenprofil reproduzieren kann. Hierbei sei angemerkt, dass es sich bei den vorgegebenen Werten um nicht verrauschte Daten handelte. Abbildung 6-162



Abbildung 6-162: Reproduktion des Oberflächenprofils an simulierten Daten sowie die Ebenheitsbewertung.

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass der Vorschub sehr genau bekannt sein muss, um feststellen zu können, wann jeder Oberflächenpunkt von jedem Sensor vermessen wird.

Linienlaser

Als zweites Konzept wird ein System mit einem einzelnen 2D-Abstandssensor genutzt, der eine Laserlinie auf die Betonfahrbahn in Fahrtrichtung ausstrahlt. Durch die Vorschubbewegung werden mit jeder Messung einige wenige neue Oberflächenpunkte aufgenommen, wobei der größte Teil der Punkte nochmals gemessen werden. Mit Hilfe eines Algorithmus sollen so die nacheinander aufgenommenen Linien aneinandergesetzt und damit das Oberflächenprofil bestimmt werden.

Das Konzept ist in der nachfolgenden Abbildung 6-163 dargestellt:



Abbildung 6-163: Funktionsweise des Konzeptes Linienlaser.

Der Algorithmus wird stets auf zwei aufeinanderfolgende Messungen angewandt und so das resultierende Oberflächenprofil reproduziert.

Für eine Machbarkeitserprobung wird in einem ersten Schritt der Algorithmus an einem simulierten, nicht verrauschten Signal entwickelt. In der Abbildung 6-164 sind zwei dieser simulierten Profile dargestellt, wobei die zweite Messung gegenüber der ersten sowohl in Vorschub- als auch in Höhenrichtung und in der Neigung verändert ist:



Abbildung 6-164: Simulierte aufeinanderfolgende Messlinien.

Der entwickelte Algorithmus wird auf die gezeigten Linien angewandt und produziert das folgende Ergebnis (vgl. Abbildung 6-165).



Abbildung 6-165: Überlagerung zwei aufeinanderfolgender Messungen.

Wie zu sehen ist, wird die Überlagerung korrekt erkannt und die nachfolgende, zweite Messung korrekt an die erste Messung angefügt.

In der Folge werden längere Wegintervalle betrachtet, bei denen viele Überlagerungen der Laserlinien vorgenommen werden. Die nachfolgende Abbildung 6-166 (unten) zeigt die simulierten Messlinien der ersten 10 Meter einer 50 Meter Simulation, die noch mit den Störungen Messrauschen, Vorschub, Höhenänderung und Neigungsänderung belegt sind.



Abbildung 6-166: Simulierte Messlinien und rekonstruiertes Oberflächenprofil

Die Auswertung muss diese Störgrößen herausfiltern, um im Anschluss die Linien zu einem Oberflächenprofil zusammenfügen zu können (vgl. Abbildung 6-146 (unten)). Wie zu erkennen ist, ist die Charakteristik beider Oberflächenprofile sehr ähnlich. Betrachtet man die gesamte Simulation von 50 Metern Profillänge (vgl. Abbildung 6-167), so ist diese gleiche Charakteristik auch noch erkennbar, auch wenn durch Akkumulieren von Offsetfehlern ein Drift entsteht.



Abbildung 6-167: Profilrekonstruktion 50 Meter Länge

Um dies zu validieren, wurde in der Folge eine Analyse durch eine Richtlattensimulation (vgl. Abbildung 6-168) durchgeführt. Es ist erkennbar, dass die Profilverläufe sehr ähnlich sind, da sowohl Verläufe, als auch Amplituden annähernd identisch sind, lediglich ein Phasenverzug unterscheidet die beiden Signale. Dass der Verlauf tatsächlich identisch ist, zeigt eine in der Folge durchgeführte Frequenzanalyse über dem Weg (vgl. Abbildung 6-169). Hierbei sind Ausschläge bei den gleichen Wellenlängen erkennbar. Die Rekonstruktion besitzt zusätzlich einen Peak im niederfrequenten Bereich, was sich durch den Signaldrift erklären lässt. Die Ebenheit wird also auch von verrauschten, überlagerten Signalen durch Rekonstruktion erkannt werden.



Abbildung 6-168: Richtlattensimulation



Abbildung 6-169: Frequenzanalyse über dem Weg

Versuche am Ebenheitsprüfstand am Institut für Straßenwesen in Aachen

Am Aachener Institut für Straßenwesen entstand ein Prüfstandsschlitten, mit dessen Hilfe der Algorithmus zur Längsebenheitsbestimmung entwickelt wird. Es werden die folgenden Anforderungen an den Prüfstand gestellt:

- Es können bekannte Störgrößen vorgegeben werden. Bei bekannten Störgrößen handelt es sich um Größen, die am Prüfstand vorgegeben werden können, während diese in der Praxis vorerst nicht bekannt sind und bestimmt werden müssen.
- Die Messungen sind vollständig reproduzierbar. Messungen, die bei gleichen Vorgaben wiederholt werden, liefern gleiche Ergebnisse.
- Es lassen sich vorher vermessene Referenzprofile am Prüfstand vermessen. Der Algorithmus soll an diesen Referenzprofilen entwickelt werden, und zwar so, dass sich das reale und das reproduzierte Oberflächenprofil nur innerhalb einer gewissen Toleranz unterscheiden.
- Neben der Untersuchung verschiedener Referenzprofile lassen sich Messungen während des Betoneinbaus durch einen Wirtgen SP 25 durchführen. Der Prüfstand sieht vor unter realen Bedingungen einen Gleitschalungsfertiger einsetzen zu können, mit dem sich eine Betonfahrbahn einer Breite von 1000 mm fertigen lässt.
- Nicht nur während, sondern auch nach dem Einbau des Betons durch den Wirtgen SP 25, kann die Oberfläche vermessen werden. Dies dient dazu, den Aushärtevorgang des Betons zu dokumentieren.
- Das System dient als Träger für verschiedene Sensorsysteme. Es ist eine Adapterplatte vorgesehen, die die Schnittstelle zu den Sensorsystemen, die von der Firma Wirtgen zur Entwicklung des Algorithmus' verwendet werden sollen, bietet.

Neben den genannten Anforderungen an den Prüfstand werden folgende Möglichkeiten der Bewegung des Schlittens vorausgesetzt:

- Es sind unterschiedliche Vorschübe realisierbar. Da Gleitschalungsfertiger i.d.R. Geschwindigkeiten von bis zu 3 m/min verwirklichen können, werden diese Vorschubgeschwindigkeiten auch an die Prüfanlage gestellt.
- Die Neigung in Längsrichtung ist stufenlos verstellbar. Durch die Nivelliereinrichtung lässt sich ein Gleitschalungsfertiger um alle drei Raumachsen verfahren. Zunächst wird vom Prüfstand verlangt, dass dieser eine Längsneigung (Nicken) nachstellen kann. Die Rotation um die beiden weiteren Achsen wird zunächst vernachlässigt. Die Neigung soll auch während einer Messung verstellbar sein.
- Messabstände bis 1 Meter sind möglich. Diese Abstände sind vor Durchführung der Messung einmalig einstellbar und bleiben über die Zeit der Messung konstant.
- Die Querposition der Sensoren ist stufenlos einstellbar. Auch diese Position bleibt, wie der Messabstand, über die Zeit konstant.

Bisher wurden mehrere Konzepte für diese Prüfanlage entwickelt, von dem eines aus einer Bewertung hervorgegangen ist. Dieses wurde detailliert und konstruiert. Das Konzept sieht einen Aufbau mit Hilfe von Traversen vor, die sich sowohl durch hohe Stabilität und Steifigkeit, aber auch durch Flexibilität auszeichnen. Des Weiteren spricht das geringe Gewicht der Aluminiumkonstruktion für dieses Baukastensystem.

Der Prüfstand (Abbildung 6-170) wurde in 2018 vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen. So wurde die vorherige Rollenführung durch eine spielfreie Laufrollenführung (vgl. Abbildung 6-171 links) ersetzt, auf der der gesamte Schlitten trotz eines Gewichtes von etwa 200 kg reibungsarm bewegt werden kann. Der Antrieb wurde als Kettenantrieb (vgl. Abbildung 6-171 rechts) ausgeführt. Mit Hilfe eines Kettenrades, einer

Übersetzung und eines Elektromotors kann so der gesamte Schlitten verfahren werden. Der Antrieb ist einseitig ausgeführt.



Abbildung 6-170: Gesamtaufbau des Prüfstandes



Abbildung 6-171: Laufrollenführung (links) und Kettenantrieb (rechts)

Des Weiteren wurde neben einer Höhenverstellung, die mit einem Handrad ausgeführt ist, eine Schwenkeinheit (vgl. Abbildung 6-172) an der Sensorik implementiert, mit der sich diese um die Querachse neigen lässt.



Abbildung 6-172: Linienlaser mit Schwenkeinrichtung

Der Prüfstand ist vollständig aufgebaut. Sowohl die Steuerung des Neigungs- als auch des Vorschubmotors wurden in die Messsoftware integriert, sodass diese direkt vom Messprogramm angesteuert werden können. In dieser Konstellation lassen sich alle gewünschten Messreihen fahren.

Neben dem Prüfstand selbst werden auch Referenzprofile hergestellt, die für die Weiterentwicklung der beschriebenen Algorithmen benötigt werden. Es sind Treppenprofile sowie periodische und überlagerte periodische Formen vorgesehen. Die Abbildung 6-173 zeigt Skizzen dieser Profile.



Abbildung 6-173: Skizzen der Referenzprofile.

Ein reales Referenzprofil zeigt die Abbildung 6-133. Die Referenzprofile sind aus einem sehr dichten, porenfreien Kunststoff hergestellt. Es lässt sich sehr gut bearbeiten und war deshalb ein idealer Werkstoff für die Referenzprofile. Die Farbe ist ähnlich wie eine Betonoberfläche relativ hell und stellt so ähnliche Bedingungen dar, wie die eingebaute Betonoberfläche.



Abbildung 6-174: Gefertigtes Referenzprofil

Es wurden alle Referenzprofile mit dem Linienlaser vermessen, um eine Grundlage für die Entwicklung des Ebenheitsalgorithmus zu bieten. Die Abbildung 6-175 zeigt die Vermessung eines solchen Referenzprofils.



Abbildung 6-175: Vermessung eines Referenzprofils

Die Referenzprofile wurden in der Folge mit Hilfe der entwickelten Anwendung ausgewertet. In der folgenden Abbildung 6-176 ist das vorgegebene Soll-Profil gegenüber der Rekonstruktion dargestellt.



Abbildung 6-176: Rekonstruktion des Referenzprofils

Es ist erkennbar, dass das Sollprofil und die Rekonstruktion nahezu identisch sind. Es kommt lediglich an einzelnen, wenigen Stellen zu Sprüngen im < 1mm Bereich in der Höhe. Weiterhin ist ein Drift der Rekonstruktion zu erkennen, der bei einer nachträglichen Ebenheitssimulation allerdings als unrelevant zu bezeichnen ist.

6.3.2.1.1 Integration eines Pavement Profile Scanners zur Erfassung der Ebenheit im Kontext der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen am Prüfstand in Aachen durch L+P

Im Arbeitspaket B 3.2 befassten sich die Arbeiten von L+P mit der Konzeption und Umsetzung innovativer Ebenheitsmesstechnik an einem Prüfstand. Im Zuge dessen wurde auf dem Gelände der RWTH Aachen unter Federführung der Fa. Wirtgen und der Fa. ISAC GmbH (Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen Aachen) ein Prüfstand konzipiert und errichtet (siehe Abbildung 6-177). Dieser sollte es ermöglichen, dass ein Betonfertiger mithilfe einer speziellen Offset-Schalung Beton auf einer Breite von 1 m und einer Länge von 15 m auf gerader Strecke einbauen kann. Im Anschluss an den Einbau sollte die Betondecke messtechnisch erfasst werden können. Hierzu wurde ein Portal-System errichtet, welches auf Schienen entlang der Einbaustrecke bewegt wurde. Am Portal hing über der Betondecke sowohl die Messsensorik der Fa. Wirtgen als auch der Fa. L+P. Das Portal selbst wurde über einen Kettenzug bewegt.

Im Folgenden werden zunächst die integrierte Sensorik und die Umstände der Messungen beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Prüfstandmessungen erläutert.



Abbildung 6-177: Lage des Prüfstandes an der RWTH Aachen. Quelle: Google Earth GeoBasis-DE/BKG (©2009).

Beschreibung der Sensorik und Messsituation

Das von L+P zur Integration am Prüfstand bereitgestellte Equipment umfasste einen Laserscanner vom Typ Pavement Profile Scanner Plus, ein Positionierungssystem vom Typ Applanix POS LV 420, eine Alu-Profil-Aufnahme für Scanner und Subkomponenten des Positionierungssystems sowie ein Flight-Rack mit Rechentechnik zur Bedienung der Messinstrumente und Speicherung der Daten. Abbildung 6-178 zeigt die Hauptkomponenten Laserscanner und Positionierungssystem am Traversen-Portal des Prüfstandes.



Abbildung 6-178: Anbau der Messtechnik bestehend aus PPS und Applanix POS LV 420 am 23.08.19 in Aachen (links). Aufbau des Portals direkt vor der ersten Messung am 26.08.19 (rechts).

Es wurden insgesamt zwei Messtermine auf dem Prüfstandgelände der RWTH Aachen geplant und durchgeführt. Die erste Messreihe fand in KW35 mit den Messtagen 26.08.2019 und 29.08.2019 statt. Die zweite Messreihe fand in KW45 mit den Messtagen 06.11.2019 und 07.11.2019 statt. Ziel der Untersuchungen war es einerseits, mit dem 3D-System als "Golden Device" Profile als Referenz für die Ebenheitssensorik der Fa. Wirtgen bereitzustellen und andererseits zu untersuchen, ob im Laufe der ersten Tage nach Herstellung der Betondecke Verformungen der Betondecke infolge des Aushärteprozesses nachgewiesen werden können.



Abbildung 6-179: Foto des eingebauten Betons am 26.08.19 (links) und eine perspektivische Ansicht des 3D Laserscans (rechts)

Während die Wettersituation in der KW35 noch optimal für die Messreihen war, störte das regnerische Wetter in der KW45 bereits den Betoneinbau am Prüfstand selbst und im Anschluss auch die 3D-Messungen der eingebauten Oberfläche. Auch wenn die gefertigte Betonoberfläche durch den Regen und den Versuch, den Beton mit einer Plane zu schützen, in Mitleidenschaft gezogen wurde, fand eine 3D-Vermessung statt (siehe Abbildung 6-180). In Absprache mit den beteiligten Projektpartnern wurden die gemessenen Profilschnitte ausgetauscht. Eine detaillierte Datenanalyse, wie die der Daten der KW35, erfolgte aber nicht.



Abbildung 6-180: Fotos von der Messsituation in der KW45. Mit Planen wurde versucht, die Betonoberfläche und den Prüfstand vor dem teils starken Regen zu schützen. Die gefertigte Betonoberfläche hinsichtlich Ebenheit zu analysieren war, wie rechts zu sehen, infolge des Regens nicht zielführend.

Für das eingesetzte Messequipment (Applanix POS LV und Fraunhofer Pavement Profile Scanner Plus) erwiesen sich unabhängig von der Wettersituation folgende Umstände als ungünstig: Zunächst war die Vorwärtsbewegung des Portals so langsam, dass die eingesetzte IMU (inertiale Messeinheit des Positionierungssystems) für die Integration durch einen Kalmanfilter im Post-Processing keine optimalen Messwerte lieferte (ungünstiges Signal/Rausch Verhältnis). Der Hersteller Trimble spezifiziert zwar keine explizite Mindestgeschwindigkeit, verwies auf Nachfrage allerdings darauf, dass die Sensorik der POS LV Serie für "mobile Anwendungen" konzipiert ist. Für Bewegungsgeschwindigkeit von ca. 0.2 km/h scheint das System – so zeigen die Erfahrungen am Experimentalprüfstand in Aachen - jedoch nicht ausgelegt zu sein. Den zweiten problematischen Umstand zeigt Abbildung 6-180. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der Prüfstand zu drei Seiten von Gebäuden umgeben ist, was keinen hinreichenden Satellitenempfang ermöglichte (Multipath-Effekte und weniger verfügbare Satelliten). Die schlechten Empfangsbedingungen des sekundären Sensors des Applanix POS LV Systems (GNSS) in Verbindung mit dem Sperrfilter des verwendeten Kalmanfilter für geringe Geschwindigkeiten äußersten sich in einer nicht stetigen Trajektorie. Da die Messungen des PPS Laserscanners (Entfernung, Reflexionsintensität, Winkel, Zeitstempel) an die Trajektorie gekoppelt sind, würden die Unzulänglichkeiten der Trajektorienberechnung 1:1 in die gescannte Betonoberfläche übernommen werden. Für die Längsebenheitsanalyse ist vor allem die Schwankung der Höhenkomponente kritisch. Um die Messdaten dennoch nutzen zu können, wurde folgender Vorgehensweise eingeschlagen: Die Trajektorien der einzelnen Messungen wurden unter der Verwendung eines Referenzstationsnetzes mit der Applanix Software POSPac MMS post-prozessiert. Im Anschluss wurden die Trajektorien in der Lage auf eine Gerade projiziert, um das Schlingern der Trajektorie zu korrigieren. Eine Gerade entspricht dabei der idealisierten Prüfstandgeometrie (Führungsschienen des Portals). Zudem wurde die Höhe auf dem mittleren Niveau der absoluten Höhe festgehalten. Diese Modifikationen funktionieren nur unter der Annahme einer geradlinigen, störungsfreien Portalbewegung.

3D-Erfassung eines Referenzkörpers

Von der Fa. Wirtgen wurde ein Referenzkörper in Form eines Balkens mit einem an der Oberseite eingebrachtem Wellenmusters bereitgestellt. Dieses Wellenmuster ist definiert durch eine Amplitude von 2 mm und einer Wellenlänge von 200 mm. Die Ergebnisse der Laserscannermessung des Referenzkörpers sind in Abbildung 6-181 dargestellt.

Trotz der nicht optimalen Messbedingungen (Deaktivierung des inertialen Positionierungssystems) bilden die vom PPS aufgenommenen Daten den Referenzkörper sehr gut ab. Das in Abbildung 6-181 dargestellte, leichte "Herauswandern" der gemessenen Welle aus der Referenzwelle lässt sich darauf zurückführen, dass aufgrund der nicht optimalen Messsituation die Messplattformbewegung auf eine Gerade im 3D-Raum projiziert werden musste und diese Annahme einer gewissen Ungenauigkeit unterliegt.



Abbildung 6-181: Links ist der 2 m lange Referenzkörper im 3D-Laserscan des PPS Plus dargestellt. Der Graph in der rechten Teilabbildung zeigt den Vergleich zwischen dem Referenzsignal und dem gemessenen Signal der Prüfkörperoberfläche.

Multitemporale Erfassung der Oberfläche am Prüfstand

Mithilfe einer wiederholten Vermessung der hergestellten Betonfläche zu zwei verschiedenen Zeitpunkten sollte der Einfluss des Erhärtens des Betons auf die Ebenheit untersucht werden. Hierzu wurden Messungen am 26.08.19 und am 29.08.19 am Prüfstand durchgeführt und die Höhenlängsprofile ausgewertet.

Durch das Anbringen kleiner globaler Korrektur-Offsets (< 1cm für die Lage und < 5 cm für die Höhe) an die Messdaten der verschiedenen Tage konnte eine sehr gute Übereinstimmung (Korrelation 98,80 %) der Profile erreicht werden (siehe Abbildung 6-182). Tabelle 6.36 gibt Auskunft über die Abweichungen, die die beiden synchronisierten Höhenlängsprofile in Z-Richtung charakterisieren.

Die durchgeführte PSD Analyse (Power Spectral Density) der beiden Höhenlängsprofile führt zu der Erkenntnis, dass sich die für die Längsebenheit relevanten Wellenlängen in den beiden verglichenen Signalen nicht signifikant unterscheiden (siehe Abbildung 6-184)



Abbildung 6-182: Perspektivische Ansicht der Laserscans vom 26.08.2019 und 29.08.2019. Die 3D-Punktwolken sind die Basis für die Extraktion und Analyse von Höhenlängsprofilen.

Tabelle 6.36: Statistische Parameter zu den Abweichungen zwischen den Profilmessungen vom 26. und 29.08.2019.

Maximum [mm]	0.57
Minimum [mm]	-0.7
Spannweite [mm]	-1.27
Mittelwert [mm]	0.0905
Standardabweichung [mm]	0.186



Abbildung 6-183: Überlagerung der beiden am Prüfstand aufgezeichneten Höhenlängsprofile. Die Y-Achse zeigt absolute Höhenlage [m] (WGS84-Höhe). Die X-Achse zeigt den Messmeter entlang des Prüfstands. Rot markiert sind die Bereiche, in denen die 4-Meter-Lattensimulation ein Stichmaß von 4 mm unter der Latte überschreitet.



Abbildung 6-184: Analyse der spektralen Leistungsdichte (PSD) der Höhenlängsprofile vom 26.08.2019 (gelb) und 29.08.2019 (blau).Beginn und Ende der logarithmischen Skala der Y-Achse sind abgeschnitten.

Abschließend wurde die mit der freien Software ProVAL eine Ebenheitsanalyse für das Profil vom 29.08.2019 in Form einer 4-Meter-Lattensimulation ("Rolling Straight Edge") durchgeführt. Wie aus Tabelle 6.37 hervorgeht, überschreiten zwei Bereiche den 4 mm Grenzwert für das Stichmaß unter der 4-Meter-Latte. Diese Bereiche liegen bei ca. Messmeter 2.5 m und 4.0 m.

von Messmeter (m)	bis Messmeter (m)	Abweichung (mm)
2.00	2.03	4.20
2.49	2.73	-4.68
3.54	4.18	-6.55
5.57	5.61	4.10
5.62	5.97	4.96
5.98	6.00	4.15
6.61	7.11	4.82

Tabelle 6.37: Ergebnisse der 4-Meter-Lattensimulation. Das Vorzeichen in der Spalte "Abweichung" gibt an, ob es sich um eine Abweichung unterhalb der virtuellen Latte handelt oder eine Erhebung über deren Niveau.

Als Fazit der Analyse der am Prüfstand aufgenommenen Daten lässt sich festhalten, dass im betrachteten Untersuchungszeitraum und mit der eingesetzten Messtechnik keine signifikante Veränderung der Oberflächenmorphologie festzustellen war. Jedoch muss auch festgehalten werden, dass die Vorschubgeschwindigkeit des Portals (ca. 0.03 bis 0.05 m/s) zu langsam und die GNSS Empfangssituation infolge der Abschattung des Prüfstands durch die umstehenden Gebäude zu eingeschränkt war, als dass die Sensoren des Positionierungssystems eine saubere Positionierungslösung produzieren konnte. Durch die beschriebene Herangehensweise, das Positionierungssystem zur Prozessierung der 3D-Daten auszuschalten, konnten die Störfaktoren zwar eliminiert werden, jedoch stützt sich die letztendliche Auswertung der Daten rein auf die Annahme, das Portal hätte sich kontinuierlich über die Zeit vorwärtsbewegt und keine nennenswerten Eigenbewegungen durchgeführt.

6.3.3 B3.3 - Untersuchung des Einflusses praxisrelevanter Parameter auf Ebenheit an Prüfstandsmaschine

Im Rahmen des Projektes wurden erfolgreich alle fünf geplanten Betoneinbauten vorgenommen. Die Maßnahmen erfolgten mit einem Wirtgen SP25i Gleitschalungsfertiger (siehe Abbildung 6-185). Dabei wurde mit einer Muldenbreite von einem Meter und einer Einbaustärke von 20 cm gearbeitet. Es konnten jeweils Strecken von etwa zehn Metern eingebaut werden. Eine Glättung durch Nachbehandlungsgeräte wurde nicht durchgeführt, ebenso wurden keine Verstärkungen im Beton eingebracht.

Während die ersten beiden Einbauten nur durch nachträgliche Vermessungen durch die Messtechnik, die am Prüfstandsschlitten installiert war, durchgeführt wurden, konnte die parallel entwickelte Softwareapplikation bereits ab dem dritten Einbau getestet werden (vgl. Abbildung 6-186).



Abbildung 6-185: Fotos vom Betoneinbau

Hierfür wurde der Laserscanner so am Fertiger angebracht, dass er unmittelbar am Muldenausgang die Oberfläche des frisch eingebauten Betons erfassen konnte. Wie diese Applikation arbeitet und aus welchen Komponenten sie besteht wird in Kapitel 7.3.3.4 näher erläutert. Nach dem Einbau wurden natürlich auch an dieser Stelle Nachher-Messungen mittels Prüfschlittens durchgeführt. (Abbildung 6-186 links)

Im Rahmen der Prüfstandsversuche wurden ca. 500 Messungen an 25 Messtagen aufgezeichnet.



Abbildung 6-186: Fotos der Vermessung durch Schlitten (l.) und direkt vom Fertiger (r.)

Es wurden bereits Messdaten, die mit Hilfe des Prüfschlittens aufgezeichnet wurden, im Rahmen des Projektes ausgewertet. An dieser Stelle soll ein Vergleich von Ergebnissen angeführt werden. Dabei wurden die folgenden beiden Messungen betrachtet:

- 1. Messung mit einer reinen Vorschubbewegung von 1 m/min
- 2. Messung mit einer überlagerten Bewegung:
 - Vorschub von 1 m/min und
 - Höhenänderung von 10 mm und
 - Neigungsbewegung von +/- 15°

Die Software bestimmt zunächst ein resultierendes Oberflächenprofil aus den aufgezeichneten Messdaten um in der Folge mittels Richtlattensimulation die Ebenheit des Profils zu berechnen. Die folgende Abbildung 6-187 zeigt die resultierende, berechnete Ebenheit des Betoneinbaus aus den Messungen 1 und 2:



Abbildung 6-187: Ebenheitsverläufe beider Messreihen

Wie zu erkennen ist ähneln sich die beiden Verläufe deutlich. Dies lässt darauf schließen, dass der Algorithmus die Störbewegungen Vorschub, Neigung und Höhenänderung korrekt bestimmt und aus den Signalverläufen eliminiert.

7 ARBEITSSCHWERPUNKT C – INTELLIGENTE BETONFAHRBAHNHERSTELLUNG 4.0

7.1 ARBEITSPAKET C1 – GANZHEITLICHE AUTOMATISIERUNGSKONZEPTE

Die Herstellung moderner Hochleistungsfahrbahnen erfordert den Einsatz und Betrieb diverser technischer Anlagen und Apparaturen von der Rohstofflagerung bis hin zur Oberflächennachbearbeitung. Insbesondere bei der Applikation zweilagiger Fahrbahnen stellen die rheologischen Eigenschaften der Betone bei der Herstellung, der Verarbeitung als auch bei der Nachbearbeitung elementare Qualitätsindikatoren dar. In diesem Kontext gilt es ein ganzheitliches Automatisierungskonzept von der Herstellung bis hin zur Oberflächenbearbeitung zu entwickeln, respektive zu erforschen. Die modellbasierte Simulation und Analyse der gesamten Prozesskette erlaubt dabei unter Berücksichtigung der empirischen Daten aus Arbeitsschwerpunkt A die Synthese mit klassischen und modernen Methoden der Automatisierungs- und Regelungstechnik.

7.1.1 C1.1 - Analytische respektive empirische Modellierung der Prozesskette vom Mischen bis hin zur Oberflächenbearbeitung der Fahrbahnbetone

In diesem Arbeitspaket wird die gesamte Organisation und Überwachung der kontinuierlichen Rohstoffversorgung der Betonherstellung (Abruf und Anlieferung, Lagerung auf Halde, Beschickung der Silos) analysiert und modelliert. Neben der gezielten Koordination der Herstellung von Unter- und Oberbeton durch Informationsaustausch zwischen Projektplattform und Leitrechner der Betonmischanlage muss die Koordination und Überwachung des Transports der Fahrbahnbetone von der Mischanlage bis zum Einbauort mit Muldenkippern oder Fahrmischern sichergestellt werden. Ziel ist die Protokollierung und Abbildung aller Logistikabläufe und darauf aufbauend die Erstellung digitaler Lieferscheine sowie Übergabeprotokolle für das Befüllen im Mischwerk und das Entleeren der Fahrzeuge am Einbauort. Die prozessrelevanten Daten müssen dabei systematisch in mathematische Modelle zur Vorbereitung der modellbasierten Analyse und Simulation überführt werden.

Hierzu können verschiedene Modellierungsansätze gewählt werden. Zur simulativen Darstellung der einzelnen Prozessschritte während des Baustellenverlaufs eignen sich besonders Modelle, welche ihre Stärken in der Darstellung sequentieller und paralleler Prozesse besitzen. Ein entsprechendes Grundkonzept wird in Kapitel 7.1.1.1 am Beispiel der Transportkette vorgestellt. Da eine reine diskrete Betrachtung bei komplexen Prozessen oft nicht genügend Einblicke in die genauen Vorgänge gibt, stellen Mischformen der beiden Domänen einen guten Kompromiss zwischen den verschiedene Detailgraden dar. Hierbei nimmt die Modellierung des Betonverhaltens eine zentrale Rolle ein, da das Materialverhalten eine wesentliche Bedeutung beim zeitlichen Ablauf der einzelnen Prozesschritte besitzt und zudem ein Indikator für eine gleichbleibende Betonqualität sein kann. Im Kapitel 7.1.1.2 ist das Konzept dieses Ansatzes.

7.1.1.1 Modellbasierte Simulation der diskreten Prozessabläufe

Durch die Baustellenanalysen in AP A konnten die vier wesentlichen Prozessschritte Betonherstellung, Transport, Einbau und Nachbearbeitung der Betonfahrbahnherstellung identifiziert werden, welche für jede Betoncharge die das Mischwerk verlässt immer sequentiell durchlaufen werden müssen. Zur strukturierten Prozessanalyse und –Dokumentation stellt daher die diskrete Modellierung ein großes Potential dar, da nur die wesentlichen Prozessschritte in einer einfachen Form bei gleichzeitigem Erhalt der Gesamtstruktur des Ablaufes der Prozessschritte dargestellt werden können. Die Darstellung dieser vier wesentlichen Prozessschritte, welche die einzelnen Betonchargen durchlaufen, ist in Abbildung 7-1 durch einen Zustandsautomaten gezeigt und stellt die oberste Hierarchieebene der kompositionellen Modellbildung dar.



Abbildung 7-1: Zustandsautomat der vier wesentlichen Prozessschritte bei der Betonfahrbahnherstellung.

Diese übergeordneten Punkte können in einem nächsten Schritt weiter detailliert werden wie in Abbildung 7-2 für einen zweilagigen Einbau gezeigt. Eine modellbasierte Darstellung des gesamten Einbauprozesses bildet die Grundlage der digitalen Vernetzung und des Konzepts des "digital twins", also eines virtuellen Zwillings bzw. Abbilds der Prozesskette. Dieses kann dazu genutzt werden, um Prozesse nachzuvollziehen, folgendes Verhalten zu prädizieren und optimieren sowie Fehler im Betriebsablauf zu erkennen und darauf zu reagieren. Dazu müssen zunächst alle relevanten Teilprozesse und Materialflüsse identifiziert werden, um die benötigten Daten und deren Erfassungsmöglichkeiten zu analysieren. Dazu wird der Gesamtprozess zunächst als ereignisdiskretes Modell repräsentiert, um die Abläufe und zeitlichen Reihenfolgen widerspiegeln zu können. Einzelne Prozessschritte laufen unterlagert auch zeitkontinuierlich ab, wie z.B. der Hydratationsverlauf des Betons, jedoch der Gesamtprozess wird als zeitdiskretes ereignisbasiertes System abgebildet.



Abbildung 7-2: Übersicht über den Gesamtbaustellenprozess unterteilt in die vier wesentlichen Prozessschritte. (Process and Data Modeling for System Integration – towards Smart Concrete Pavement Construction, 2020)

Zunächst werden in der Mischanlage auf Basis der zugeführten Materialien (Gestein, Sand, Zement, Wasser, Zusatzmittel) einzelne Betonchargen produziert. Die Rezepturen dieser Chargen unterscheiden sich dabei im Fall eines zweilagigen Einbaus. Dementsprechend werden zwei getrennte Logistikketten für den Unter- und Oberbeton modelliert. Nach erfolgter Mischung werden die Chargen in ein Transportfahrzeug (Muldenkipper, Fahrmischer) gegeben. Ein Transportfahrzeug transportiert dabei in der Regel mehr als nur eine Charge, in diesem Fall ergeben z.B. 4 Chargen eine Transportcharge. Der Transportprozess an sich kann vereinfacht als Kreisprozess mit den Schritten Beladen, Transport zur Baustelle, Warten vor dem Abkippen, Abkippen, Rückfahrt und Warten vor der Mischanlage modelliert werden. Im nächsten Schritt werden die abgeladenen Transportchargen entweder vom Unter- oder Oberbetonfertiger verarbeitet. Eine eventuelle Vorverteilung mittels Bagger oder Förderbändern ist hier vernachlässigt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Einbau des Unterbetons zeitlich vor dem Einbau des Oberbetons erfolgen muss. In diesem Schritt wird aus den diskreten Transportchargen eine kontinuierliche Fahrbahnschicht gefertigt. Während oder vor dem Einbau müssen zudem Dübel platziert bzw. eingerüttelt werden. Als ersten Schritt der Nachbearbeitung wird in der Regel direkt nach dem Einbau ein Verzögerer aufgesprüht um ein zu schnelles Aushärten der Betonoberfläche zu verhindern. Sobald die Oberfläche annähernd ausgehärtet ist, wird diese ausgebürstet. Zudem werden Fugenschnitte gesetzt.

Typischerweise beträgt die Zeit vom Befüllen eines Mischers bis zum Ende eines Mischvorgangs zwischen 2 und 3 min. Größere Schwankungen treten oft beim Transportvorgang auf. Je nach Entfernung der Mischanlage und der Verkehrssituation kann diese zwischen 10 min und einer Stunde schwanken. Einbaugeschwindigkeiten der Fertiger liegen im Bereich von 1 m/min. Der Verzögerer wird in der Regel unmittelbar nach dem Einbau aufgetragen. Die Oberfläche wird, je nach Betonrezeptur und Wetter, nach ca. 5 h ausgebürstet und der Fugenschnitt erfolgt z.B. nach 10 h. Insgesamt ergibt sich damit eine Zeitspanne von ca. einem halben Tag zwischen Mischen und fertig bearbeiteter Oberfläche.

Während dieses Prozesses fallen Daten sowohl an den einzelnen Prozessschritten und Maschinen an aber auch z.B. bei der Überwachung der Rohstoff-, Frisch-, und Festbetoneigenschaften. Diese manuellen Labormessungen sind in Abbildung 6.2 durch Dreiecke dargestellt. Zudem können nach dem Ende der Nachbearbeitung und vor der Freigabe der Fahrbahn Oberflächenscans zur Bestimmung der Ebenheit durchgeführt werden (gekennzeichnet durch "A" für "approval test"). Diese Messdaten müssen ebenso als Schnittstellen für das Modell vorgesehen werden. Die sich ergebende Fahrbahnstruktur ist dazu nochmals in Abbildung 7-3 verdeutlicht. HBB steht in diesem Zusammenhang für die hydraulisch gebundene Tragschicht.



Abbildung 7-3: Schematischer Aufbau einer zweilagig gefertigten Betonstraße mit zwei Fahrspuren und einem Standstreifen [Skalecki et al. 2020].

Der Detailgrad des Modells wird erhöht, indem exemplarisch der Prozessschritt *Transport* als Subsystem modelliert wird. Da die Darstellung als Zustandsautomat aufgrund der parallelen Struktur (durch das Abbilden der verfügbaren LKWs) eine unnötig hohe Zahl an Zuständen erfordern würde, ist die Darstellung als Petri-Netz geeigneter. Die Abbildung 7-4 zeigt das Petri-Netz des Transportprozesses, wobei aus Übersichtlichkeitsgründen nur der Unterbeton-Transport mittels LKW gezeigt wird und der Oberbeton-Transport sich analog darstellen lässt (vgl. Abbildung 7-2). Hierbei beschreiben die Kreise Zustände, Punkte Tokens, Balken Transitionen und Pfeile Kanten. Die Zustände repräsentieren die Zustände die beispielsweise ein LKW während des Transportprozesses (z.B. LKW voll, fährt zum Fertiger) durchlaufen kann. Die Tokens können als Ressourcen/Objekte (z.B. LKW, Betonchargen) interpretiert werden. Transitionen und Kanten beschreiben den Übergang von Tokens zwischen den Zuständen. Dabei können sowohl Tokens entstehen (LKW abladen, F \rightarrow Betoncharge vor Fertiger + LKW leer, F) als auch verbraucht (LKW beladen + 4 Mischungen \rightarrow LKW voll, MW) werden.

Das entworfene ereignisdiskrete Modell wird als Grundlage zur automatisierten Prozessüberwachung und Dokumentation im Bereich der Datenakquise und des Datenmanagements in AP C2.1 sowie AP C3.1 dienen, indem beispielsweise prozessbedingt korrelierte Daten identifiziert und gebündelt werden. Ein weiterer Aspekt dieser Modellbildung ist, dass diese als Backend (Rückgrat) eines zustandsorientierten Visualisierungskonzepts dienen kann, welches in AP C3.4 bearbeitet wird. Ein erster Entwurf der Umsetzung eines auf dieses Modell angepassten Datenmodells im Zuge der digitalen Vernetzung ist in AP C2.1 erläutert.



Abbildung 7-4: Modellierung des Transportprozesses als Petri-Netz (MW Mischwerk, S Strecke F Fertiger).

7.1.1.2 Modellierung des Betonverhaltens während der Hydratation

Aufbauend auf der Literaturrecherche wird der Ansatz der Makro-Struktur-Modelle gewählt, da dieser sich auf das relevante Materialverhalten beschränkt (vgl. Kapitel 1.2.1.4). Des Weiteren unterliegen die im Rahmen des Straßenbaus verwendeten Betone strengen Auflagen mit dem Ziel der Gewährleistung einer reproduzierbaren und hohen Qualität der Eigenschaften der Betone.

Entsprechend der Entwicklung des Makro-Struktur-Modells [Wan et al. 2016] wurde als Basis für die Modellierung des Frischbetonverhaltens der Ansatz nach [Cervera et al. 1999] gewählt, da hier der Fokus auf den chemisch-thermisch-mechanischen Eigenschaften liegt. Dabei werden im ersten Schritt die chemisch-thermischen Eigenschaften des Modells evaluiert. Die Modellierung der Ausbildung der mechanischen Eigenschaften während der Hydratation soll im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens ebenfalls betrachtet werden.

Als Basis zur simulativen Untersuchung wird das chemisch-thermische Modell betrachtet, welches durch

$$\dot{\xi}(x,t) = \overbrace{A_1\left(\frac{A_2}{\xi_{\infty}} + \xi(x,t)\right)\left(\xi_{\infty} - \xi(x,t)\right)exp\left(-\frac{\eta}{\xi_{\infty}}\xi(x,t)\right)}^{chemisches Potential}} \underbrace{exp\left(-\frac{E_a}{R(T(x,t)+273.15^\circ C)}\right)}_{Warmeleitung}$$
(1)
$$C\dot{T}(x,t) = \underbrace{\nabla \cdot \left(k \nabla T(x,t)\right)}_{Warmeleitung} + \underbrace{Q\dot{\xi}(x,t)}_{Reaktionswarme}$$
(2)

mit den Anfangsbedingungen und exemplarischen Randbedingungen über den Rand Γ (Betrachtungsgrenze)

Anfangsreaktionszustand $\overline{\xi(x,0)} = 0$, $\underline{T(x,0)} = T_0(x)$ und $\underline{T(x,t)}|_{x \in \Gamma} = T_{\Gamma}(t)$ Anfangstemperatur Temperaturvorgabe am Rand

gegeben ist. Hierbei beschreibt die Gleichung (1) die Reaktionskinetik der makroskopischen Zement-Wasser Reaktion und die Gleichung (2) die Temperaturdynamik innerhalb des modellierten Körpers. Die Reaktionslaufzahl ξ und die Temperatur T werden als Zustände des Modells gewählt. Die Reaktionslaufzahl ξ beschreibt, wie weit eine Reaktion abgelaufen ist. D.h. bei $\xi(\cdot) = 0$ liegen alle Ausgangsstoffe noch vor und bei $\xi(\cdot) = 1$ ist die Reaktion komplett abgeschlossen. Die Bedeutung der weiteren Parameter des Modells können der Tabelle 7.1 entnommen werden. Zur besseren Darstellung der Realität müssen die Randbedingungen beispielsweise über Konvektion und ggf. weitere Verlust- bzw. Produktionsterme angepasst werden.

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\xi(x,t)$	Reaktionslaufzahl (zw. 0 und 1)	[-]
T(x,t)	Temperatur	[°C]
ξ_{∞}	Endwert der Reaktion	[-]
A_1	Empirischer Hydratationsparameter	$[h^{-1}]$
A_2	Empirischer Hydratationsparameter	[-]
η	Empirischer Hydratationsparameter	[-]
E_a	Aktivierungsenergie des Arrheniusfaktors	[K]
R	Allgemeine Gaskonstante	[-]
С	Wärmekapazität ($\mathcal{C}= ho c$)	[J/(kg K)]
k	Wärmeleitungskoeffizient	[J/(m h K)]
Q	Hydratationsentalpie der Reaktion	$[J/m^{3}]$

Tabelle 7.1: Parameter des Frischbetonmodells

Wird eine Fahrbahn betrachtet können aufgrund der Dimensionierung die Längs- und Querrichtung als adiabat angenommen werden. So vereinfacht sich der betrachtete Bereich zu dem Höhenprofil in der Fahrbahnmitte, vergleiche die rote Linie in Abbildung 7-5.



Abbildung 7-5: Abstraktion der Fahrbahn als 1D Profil (rote Linie).

Das Modell des Fahrbahnprofils kann sowohl unter Laborbedingungen (konstante Umgebungsbedingungen) als auch mit realen Wetter- und Erdbodentemperaturen simuliert werden. Der Einfluss von realen Temperaturschwankungen auf den Hydratationsprozess kann somit exemplarisch untersucht werden. Die Ergebnisse beider Simulationen, sowohl für die Reaktionskinetik als auch die Temperaturdynamik, sind in Abbildung 7-6 dargestellt. In den linken zwei Graphen wurden Laborbedingungen bei 21 °C angenommen und in den rechten zwei Graphen wurde die Simulation mit realen Wetterdaten (Wetterstation Stuttgart Schnarrenberg, im Juni 2016, Quelle DWD) durchgeführt.

Die Reaktionskinetik beider Simulationen zeigt das qualitative Verhalten der Betonhydratation. In den ersten 6h findet die "Inkubationsphase" statt, bei der die Zement-Wasser Reaktion quasi nicht abläuft. Anschließend läuft in der zweiten Phase die Reaktion schnell ab. In der letzten Phase erfolgt die Reaktion nur noch sehr langsam und konvergiert asymptotisch gegen den Endwert der Reaktion $\xi_{-\infty}$. Des Weiteren ist eine schwache Temperaturabhängigkeit der Reaktionskinetik im betrachteten Temperaturspektrum zu bemerken. In beiden Simulationsläufen ist relativ zu Beginn der Reaktion eine Temperaturspitze zu erkennen, welche auf die exotherme Zement-Wasser-Reaktion zurückzuführen ist. Der Effekt der Wärmeleitung kann insbesondere in der zweiten Phase der Reaktion beobachtet werden, da an den Grenzen zur Oberfläche (Position 0 m) und zum Boden (Position 0,3 m) idealisiert die Umgebungstemperaturen vorgegeben werden. Bei der Simulation mit Wetterdaten kann dieser Wärmeleitungseffekt durch einen kontinuierlichen Anstieg bzw. Abfall der Temperatur von der Oberfläche zum Boden hin beobachtet werden. Der starke Temperaturabfall am Anfang wird durch den warmen Beton in einer kälteren Umgebung hervorgerufen.



Abbildung 7-6: Ergebnisse der Simulation eines Fahrbahnprofils mit Literaturparametern unter Laborbedingungen (links) und mit realen Wetterdaten (rechts).

Im weiteren Verlauf des Projektes wird das Modell anhand von Temperaturmessungen evaluiert und die Parameter identifiziert. Ziel ist es, ein realitätsnahes Materialverhalten im Modell abzubilden. Des Weiteren werden die FreshCon-Messungen genutzt, um den thermo-chemischen Prozess für die Anwendbarkeit der auf Fahrbahnbetone zu zeigen (Kapitel 6.1.2.3). Darüber hinaus könnte dieser Modellierungsansatz auch um die mechanischen Eigenschaften erweitert werden und anhand der mechanischen Messwerte des innovativen US-Messsystems zur Erfassung des Hydratationszustands evaluiert werden. Somit kann das FreshCon-System modellbasiert in das Prozessleitsystem integriert werden und ggf. der Hydratationszustand dichter prädiziert werden als er sensorisch erfassbar wäre.

7.1.2 C1.2 - Modellbasierte Simulation und Analyse des Herstellungsprozesses

Die theoretischen Grundlagen, welche in AP C1.1 vorgestellt wurden, können in einem nächsten Schritt zur Modellierung einzelner Prozesse genutzt werden.

7.1.2.1 Modellbasierte Simulation des Mischprozesses

Zur Simulation werden in enger Kooperation zwischen dem ISYS und der Firma Liebherr unterschiedliche Verfahren eingesetzt und auf ihre Eignung zur qualitativen und quantitativen Rekonstruktion des Mischprozesses validiert, siehe Abbildung 7-7.



SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

The SPH is a gridless, particlebased simulation method using weighted interpolation points. It is possible to simulate the movements and mixing of fluids and solids.



Abbildung 7-7: Verfahren zur Simulation des Mischprozesses.

In einem ersten Schritt wurde hierbei die Mischgütebestimmung systematisch auf Basis von DEM-Simulationen weiterentwickelt um Problematiken in realen Versuchen zu begegnen. Das Ergebnis kann der folgenden Abbildung 7-8 entnommen werden.



Abbildung 7-8: Mischgütebestimmung – Umsetzung realer Versuch versus Simulation

Des Weiteren wurden zur Analyse der Verteilung des Wassers im Mischer CFD-Simulationen durchgeführt. Diese ermöglichen es konstruktive Optimierungen, z.B. Konstruktion des Prallbleches, durchzuführen, um die Qualität des Mischprozesses zu steigern. Ein Beispiel ist dazu in Abbildung 7-9 zu finden.



Abbildung 7-9: CFD Simulation der Wasserverteilung im Mischer mittels ANSYS

Die Verfahren und Methoden müssen im weiteren Verlauf des Projektes systematisch weiterentwickelt werden.

7.1.2.2 Modellierung des Mischerantriebstrangs zur Signalaufbereitung und Integration in die Prozessüberwachung

Um die Qualität des Mischprozesses und des Betons zu beurteilen werden in der Literatur zwei Ansätze verfolgt. Zum einen kann durch konstruktive Maßnahmen ein verbesserter Antriebsstrang konstruiert und umgesetzt werden, der eine direkte Interpretation der Betonqualität liefern kann. Zum anderen können die Messdaten des vorhandenen Antriebsstrangs durch signaltechnische Analysen aufbereitet werden. Ziel der zweiten Maßnahme ist es ohne oder mit relativ geringen konstruktiven Maßnahmen grundlegende Aussagen über die Qualität des Betons, wenn auch mit einer größeren Unsicherheit, treffen zu können. Zu diesem Thema wurden in der Literatur einige Studien analysiert und ein vergleichbares Konzept, welches vereinfachte konstruktive Maßnahmen mit signaltechnischen Analysen kombiniert, von Liebherr in Kooperation mit dem ISYS entwickelt und auf den Labormischer übertragen.

Hierbei betrachtet beispielsweise [Cazaliu et al. 2009] den Verlauf der elektrischen Wirkleistung sowie die Schwankungen während des Mischens oder [Dils et al. 2012] nutzt die elektrische Wirkleistungsabnahme zur Bestimmung der optimalen Mischzeit. [Juez et al. 2017] haben eine Studie zur Auswertung von Kamerabildern während des Mischens durchgeführt und diese anhand des Wirkleistungsverlaufs validiert. Diese Studien teilen alle die gleiche Kernidee. Sie nutzen einen Indikator, den elektrischen Wirkleistungsverlauf, um den Mischprozess anhand des mechanischen Mischwiderstands, wie beispielsweise des Scherwiderstands bzw. -verlaufs, zu charakterisieren. Daraus leitet sich ab, dass die Qualitätseinschätzung sich verbessert, wenn das elektrische Wirkleistungssignal aufbereitet und somit um Störeffekte bereinigt wird. Diese Störeffekte sind beispielsweise Reibverluste, dynamische Anteile, welche bei Beschleunigung des Mischers entstehen oder störende Charakteristiken des Mischers. Deshalb wird im Folgenden ein echtzeitfähiges modellbasiertes Filter entwickelt, welches diese Störeffekte bereinigt. Dieses Filter wird anhand einer experimentellen Studie entworfen und validiert. Abschließend wird dieses Filter mit klassischen Signalfiltern wie einem Tiefpass- und Mittelwertfilter verglichen. Um in jedem Schritt übertragbar zum Realmaßstab zu bleiben, werden parallel auch Messwerte einer großen Mischanlage mitbetrachtet.
Als Ausgangspunkt der Studie dienen der Liebherr Doppelwellen-Labormischer DW 0.06 und die Mischanlage Liebherr MobilMix 2.5 mit Doppelwellenmischer von Schnorpfeil. Diese Aufbauten lassen sich besonders gut vergleichen, da im Prinzip derselbe Mischer in verschiedene Größenskalen implementiert ist. Die Fa. Liebherr hat in diesem Zusammenhang bereits erste Verbesserungen am Labormischer vorgenommen, wie in Kapitel 6.1.2.4 näher beschrieben. Dabei wurde der konventionelle Antriebsstrang so modifiziert, dass geringere Antriebselastizitäten auftreten. Hierzu wurde die Kraftübertragungstopologie angepasst, um einen steiferen Antriebsstrang zu gewährleisten.

Die Signalaufbereitung basiert auf den Messwerten der elektrischen Wirkleistung und des Positions-/Drehzahlsignals der Mischwelle, welche sich ohne großartige technische Veränderung aufzeichnen lassen. Ein beispielhafter elektrischer Wirkleistungsverlauf für einen Beton, welcher bei konstanter Drehzahl gemischt wurde, ist in Abbildung 7-10 gezeigt. Der obere Verlauf zeigt die Herstellung einer Charge auf der MobilMix 2.5 und der unten auf dem Labormischer DW 0.06. Im Vergleich ist auffällig, dass am Beginn bis zur ersten vertikalen grauen Markierung deutliche Unterschiede vorliegen. Dies liegt an der unterschiedlichen Art und Weise der Materialbeschickung. Während bei der MobilMix die Beschickung auf die laufende Mischwelle stattfindet, wird bei dem Labormischer der Mischraum erst mit den trockenen Materialien gefüllt und bei Start der Bewegung die nassen Stoffe hinzugegeben. Der weitere Verlauf der Wirkleistung zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung. Sowohl die kurze Wirkleistungszunahme am Anfang, die Abnahme der Wirkleistung während des Mischens als auch die Charakteristik des Doppelwellenmischprinzips mit den überlagerten Schwingungen ist in beiden Signalen deutlich erkennbar. Die zweite Markierung weist auf den Entleervorgang hin, welcher durch den sehr ähnlichen Aufbau auch vergleichbar ausfällt. Das Signal in dem Labormischer ist deutlich verrauschter als die MobilMix. Dies kann durch das große Korn im Labormischer im Verhältnis zur Mischergröße hervorgerufen werden.



Abbildung 7-10: Vergleich des Wirkleistungsverlaufs zwischen der Mischanlage Liebherr MobilMix 2.5 von Schnorpfeil (oben) und dem Liebherr Labormischer DW 0.06 (unten) [Skalecki et al. 2020a].

Da die Charakteristiken des Mischprozesses und der Mischer eingehend studiert werden sollen und das transiente Verhalten des Mischguts, wie beispielsweise die Leistungsabnahme während des Mischens, für den Entwurf des Filters nicht relevant sind, wurde für die weiteren Untersuchungen auf Sand als Mischgut gesetzt. Dies bietet den Vorteil, dass das experimentelle Versuchsprogramm ressourcenschonend und zeiteffizient durchgeführt werden kann. Das Versuchsprogramm zur Analyse der Mischercharakteristik umfasst die Variation der Mischwellendrehzahl von 30 auf 100 rpm in 10 rpm Schritten und des Füllgrades von 10 auf 100 l

ebenfalls in 10 l Schritten. Somit wird der gesamte Arbeitsraum des Mischers in einem Gitter aus 80 stationären Drehzahl-Füllstands Kombinationen abgedeckt. Dieses Versuchsprogramm stellt die Datengrundlage zum Entwurf des modellbasierten Filters dar. Vor der Durchführung des Versuchsprogramms wurde der Mischer ausgiebig warmgefahren, damit sich durch Betriebstemperaturänderungen keine systematischen Fehler einstellen.

Die Modellierung des Mischers erfolgt in drei Schritten. Zuerst werden die Verlusteffekte modelliert, dann das mechanische Modell zur Abbildung der dynamischen Effekte und abschließend wird ein dynamisches Signalmodell anhand des Versuchsprogramms aufgestellt. Die Verlusteffekte werden in der Drehzahl als quadratisch modelliert und müssen für die unterschiedlichen Betriebstemperaturzustände bestimmt werden. Diese Temperaturabhängigkeit wurde im Rahmen dieser Studie immer vor dem Anwenden des Modells in einer vorgelagerten Routine automatisiert bestimmt, damit mit einer korrekten Bedatung der Verlustkennlinie die Evaluation des restlichen Filters stattfindet. Die Verlustkennlinie sowie die entsprechenden stationären Leerlaufdrehmomente sind für drei exemplarische Betriebstemperaturen in Abbildung 7-11 dargestellt. Dies zeigt, dass die quadratische Annahme der Verluste innerhalb des Arbeitsspektrum der Drehzahl gut zu den erhobenen Daten passt.



Abbildung 7-11: Verlustcharakteristik des elektrischen Drehmoments an verschiedenen stationären Drehzahlenpunkten und quadratisches Modell (Linien) bei verschiedenen Temperaturzuständen [Skalecki et al. 2020a].

Die mechanische Modellierung des Mischers basiert im Wesentlichen auf dem Drallsatz. Aufgrund der Ausstattung des Mischers mit einem Frequenzumrichter (ein summarisches Wirkleistungssignal) für beide Asynchronmaschinen (vgl. Kapitel 6.1.2.4), werden beide Antriebsstränge bestehend aus einer Mischwelle, einem Getriebe und der Asynchronmaschine für das Modell zu einer summarischen Trägheit zusammengefasst. Die entsprechenden Teilsystemträgheiten wurden durch Liebherr aus den Datenblättern und Konstruktionszeichnungen ermittelt und dem ISYS bereitgestellt. Somit reduziert sich die gesamte Dynamik des mechanischen Teilsystems auf eine virtuelle Welle, welche die gesamte mechanische Dynamik des Mischers abbildet.



Abbildung 7-12: Mittelwertfreies, normalisiertes Frequenzspektrum des Drehmomentensignals bei einem Füllgrad von 60 l und einer Mischwellendrehzahl von 80 rpm (links) und die Maxima der ersten acht Vielfachen aller Frequenzspektren des experimentellen Versuchsprograms [Skalecki et al. 2020a].

Die Modellierung der Material und Mischercharakteristik im Drehmomentensignal durch ein dynamisches Signalmodell erfordert eine detailierte Analyse der zu modellierenden Effekte. Hierbei werden die Dynamik des Mischguts und die Effekte durch das Mischsystem unterschieden. Die zeitliche Dynamik des Mischguts ist im Fall von Sand nicht vorhanden und bei Beton kann von einer langsamen Dynamik ausgegangen werden. Somit besteht der Anteil der Mischgutdynamik aus dem Standardmodell zur Offset/Drift-Schätzung. Der Anteil des Mischprinzips besteht im Hauptteil aus überlagterten Schwingungen. Betrachtet man das mittelwertfreie Frequenzspektrum in Abbildung 7-12 links, welches um die aktuelle Drehfrequenz der Mischwelle (Grundfrequenz) normalisiert wurde, ist auffällig, dass die Schwingungen aus der Grundfrequenz und deren Vielfachen bestehen. Dies wird anhand aller Frequenzspektren des Versuchsprograms weiter untersucht. Betrachtet man alle Maximas dieser Frequenzspektren in Abbildung 7-12 rechts ist auffällig, dass sich ein sehr enges Trefferbild auf der Frequenzachse (x-Achse) einstellt und ein Breites in der Amplitude der Drehmomentenschwingung. Hierbei ist für das Signalmodell besonders wichtig, dass Frequenzen mit einem hohen Aptlitudenanteil einen präzisen Frequenzanteil besitzen. Da dies gegeben ist können diese Anteile durch ein harmonisches Oszillatormodell pro berücksichtigter Frequenz beschrieben werden. Die hohe Varianz in der Amplitude wird durch den modellbasierten Filter geschätzt. Damit die Vergleichbarkeit zur Baustelle bestehen bleibt wurden diese Frequenzanalysen auf die Messdaten einer Tagesleistung der Messkampagne Köln-Wahn I für die MobilMix 2.5 durchgeführt und in Abbildung 7-13 dargestellt. Dies zeigt, dass auch die Mischanlage im Realmaßstab eine ähnliche Frequenzcharakteristik aufweist und die Ergebnisse des Labormischers durchaus übertragbar sind. Auffällig ist, dass die Ausprägung der einzelnen Frequenzen durchaus verischieden zum Labormischer sind. Dies könnte durch die leicht unterschiedliche Geometrie der Mischwerkzeuge und Skalierungseffekte hervorgerufen werden. Da aber die generelle Form erhalten bleibt und sich somit nichts an der grundlegenden Signaldynamik ändert, kann das Modell des Filters dies abbilden.



Abbildung 7-13: Maxima der verschiedenen Frequenzspektren einer Tagesleistung in Köln-Wahn I der MobilMix Mischanlage {Skalecki et al. 2020a].

Als Filtertechnologie wird auf Basis der vorhergenannten Modellierung der Teilsysteme ein erweitertes Kalmanfilter (EKF) entworfen. Hierzu werden diese Modelle zu einem gemeinsamen Zustandsraummodell zusammengefasst. Da bei dem Entwurf des Filters Parameter eingestellt werden müssen, werden diese anhand der drei wesentlichen Kriterien

- 1. ein präzises und schnelles Trennen des Mittelwerts- und Schwingungsanteil im Drehmomentensignal
- 2. ein glattes und schnelle Aufbereiten des Drehzahlsignals (wichtig für Leistungsrekonsturktion)
- 3. ein Parametersatz, welcher im gesamten Betriebsbereich des Mischers funktioniert

optimiert. In Abbildung 7-14 links ist ein Vergleich der Schätzung des EKFs mit den Rohmesswerten dargestellt. Im oberen Teil ist ein 3 sec Ausschnitt der Mischwellendrehzahl und im Unteren der zugehörige Ausschnitt des Drehmomentensignals gezeigt. Grau sind die Rohmesswerte und schwarz die Schätzungen bzw. –anteile. Es ist zu erkennen, dass sowohl das Drehzahl- als auch das Drehmomentensignal gut rekonstruiert wird. Da jedoch nicht das Rohsignal für weiterführende Interpretationen der Qualität des Mischguts dient, sondern nur der in das Mischgut eingetragene Anteil, wird der Offset-Anteil (mean EKF) weiter betrachtet. Dieser ist in diesem 3 sec Abschnitt konstant und erfüllt somit das Entwurfskriterium. In Abbildung 7-14 rechts ist der Vergleich der verschiedenen Filteransätze anhand einer Testtrajektorie abgebildet. Hier wurde der Labormischer mit 50 l Sand beladen und zunächst mit einer Drehzahl von 40 rpm gefahren. Dann wurde die Drehzahl mit einer steilen Rampe auf 80 rpm erhöht und später wieder auf 50 rpm abgesenkt. Da die Betrachtungen in der Literatur auf Leistungsebene stattfinden, wurde auf Basis der geschätzten Drehzahl und -moments die eingetragene mechanische Leistung rekonstruiert und mit dem über die Verlustkennlinie bereinigten Wirkleistungssignals verglichen. Weiter wurden noch zwei klassische Signalfilter, ein Mittelwertfilter (blau, moving average) und ein Butterworth Tiefpass (rot, butterworth LP) entworfen und auf das Leistungssignal angewendet. Diese Filter können das Leistungssignal sehr gut von dem Schwingungsanteil bereinigen, jedoch sobald der Mischer nicht mit einer stationären Drehzahl betrieben wird, reagieren diese durch das "aggressive" Filterverhalten stark verzögert. Betrachtet man nun das Filterverhalten des EKFs, so fällt auf, dass dieser auch die Schwingungen sehr gut bereinigt. Der Arbeitspunktwechsel wird ebenfalls unverzögert erfasst. Der schnellere Anstieg bzw. Abfall des Rohsignals sowie das überschwingende Verhalten sind auf die Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsarbeit des Mischerantriebs zurückzuführen. Somit werden auch diese Effekte sauber herausgetrennt und nur noch die in das Mischgut eingetragene Leistung wird erfasst. Vergrößert man das Leistungssignal weiter ist ein Rauschen zu beobachten. Dieses resultiert aus dem Drehzahlsignal und ist vermutlich ein Artefakt aus der Drehzahlregelung des Frequenzumrichters, da dieser nicht perfekt die Drehzahl bei einem solch wechselndem Lastprofil halten kann.



Abbildung 7-14: Vergleich der Schätzung des EKFs mit den Rohmesswerten (links) und Vergleich der Leistungsfähigkeiten der Filtertypen eines Mittelwertfilters (moving average), Butterworth Tiefpass (LP) und des vorgestellten EKF (mean EKF) (rechts). (Observer Design for non-stationary oscillating Disturbances in Mixing Processes, 2020)

Weitere Details und tiefergreifende Analysen können [Skalecki et al. 2020a] entnommen werden. Durch diese Methode wird dementsprechend ein sauberes Leistungssignal, welches um Verluste, dynamische Effekte z.B. des Mischwerkzeugs und Schwingungen bereinigt ist, erzeugt. Ein solches bereinigtes Signal sowie die Schätzung des Schwingungsanteils kann im Folgenden zur weiteren Analyse des Mischvorgangs vor allem hinsichtlich der Beschaffenheit des Betons verwendet werden wie z.B. in [Cazacliu et al. 2009] beschrieben. Durch die echtzeitfähige Implementierung des EKFs kann zudem eine online Analyse während des Mischvorgangs erfolgen, welche ggf. zu einer Regelung der Betonmischung verwendet werden kann.

7.1.2.3 Betonaushärtung: Reduziertes Hydratationsmodell & Validierung mit Messdaten eines realen Betons

Während zuvor vor allem auf den Mischprozess und die Analyse des Betons während des Mischprozesses eingegangen wurde, kann der Beton auch nach erfolgter Mischung modelliert werden. Dazu wurde ein Modell für die Erhärtung, welches in der Literatur vorgestellt wurde, modifiziert und anhand von Laboruntersuchungen adaptiert und optimiert.

Jeder Prozessschritt im Betonstraßenbau, insbesondere die Nachbearbeitungsschritte Oberflächenbürsten und Fugenschneiden, beruhen auf definierten mechanischen Eigenschaften des jungen Betons. Die Herausforderung dabei ist die Entwicklung des Hydratationsgrades über die Zeit und damit auch die Änderung der Betonfestigkeit während des Aushärtungsprozesses. Eine zentrale Aufgabe ist daher die genaue Bestimmung des Zeitintervalls, in der Nachbearbeitungsschritte durchgeführt werden, um eine hochwertigen Betonfahrbahn zu erhalten. Ein Modell zur Vorhersage des Hydratationszustands und damit indirekt der Betoneigenschaften bietet dabei große Vorteile, ist jedoch aufgrund der wechselnden Betonrezepturen jedoch auch herausfordernd.

Dabei wird in der Literatur zwischen zwei Modellierungstiefen unterschieden: Mikro- und Makrostrukturmodellen. Mikrostrukturmodelle eignen sich dabei vor allem für detaillierte Untersuchung des Betons in Bezug auf Mischungsdesign oder grundlegende Materialforschung. Sie sind jedoch für die Anwendung in Echtzeit oder auf limitierten Rechensystemen zu rechenintensiv. Makrostrukturmodelle hingegen beschreiben den Beton als eine homogene Materialmischung. Sie konzentrieren sich auf die Entwicklung von Materialveränderungen und -eigenschaften auf einer Zentimeter-zu-Meter-Skala. Die Modelle koppeln dabei die Reaktionskinetik an ein spezifisches Wärmeprofil für die Hydratation und eine einhergehende Zunahme der Festigkeit und wurden kontinuierlich erweitert wie in [Cervera et al. 1999], [Cervera et al. 2000], [Luzio et al. 2009a], [Luzio et al. 2009b] beschrieben. Diese Ansätze basieren auf den volumetrischen Bilanzgleichungen, die aus der Thermodynamik abgeleitet sind. Sie sind typischerweise gekoppelt mit empirischen Gesetzen, die aus experimentellen Beobachtungen der makroskopischen Reaktionskinetik abgeleitet wurden. Solche Modelle sind also in der Lage, unterschiedliche Auswirkungen recheneffizient abzubilden. Aufgrund des starken Fokus auf Beobachtungen während des Modellentwurfs ist die Kalibrierung auf verschiedene Mischungsentwürfe jedoch notwendig.

Über eine Relaxation eines solchen allgemeinen thermochemischen Hydratationsmodells für Beton auf Makroebene kann ein vereinfachtes Modell gewonnen werden, welches an den gegebenen Aufbau anzupassen ist. Nähere Informationen zur Herleitung sind in Kapitel 7.1.1.2 gegeben. Weitergehende Analysen sollen im Rahmen des Projekts veröffentlicht werden und werden hier nicht näher dargestellt.

Die Versuchsbeschreibung und -durchführung fand dabei an der MPA statt und ist in Kapitel 5.2.2.2 detailliert erläutert. Im Folgenden wird auf Basis der Messungen ein Modell aufgestellt, parametrisiert und validiert. Das Modell aus 7.1.1.2 wird dazu relaxiert und ergibt sich unter der Annahme, dass nur noch ein Temperaturmesspunkt anstatt einer örtlichen Verteilung verwendet wird, als

$$\dot{\xi}(t) = \tilde{A}(\xi(t)) \exp\left(-\frac{E_a}{R(T(t) + 273.15^{\circ}C)}\right)$$
$$C\dot{T}(t) = Q\dot{\xi}(t) - \alpha(T(t) - T_u(t))$$

mit den Anfangsbedingungen

$$\xi(0) = 0, \quad T(0) = T_0,$$

Die verwendeten Parameter sind dabei in Tabelle 7.2 erläutert. Die erste Gleichung beschreibt die Reaktionskinetik der Hydratation, wobei $\xi(t)$ den Hydratationsindex darstellt, welcher zwischen 0 (nicht hydriert) und 1 (komplett hydriert) verläuft. Die zweite Gleichung beschreibt den klassischen Wärmetransportprozess, wobei T(t) das Temperaturprofil, C die Wärmekapazität, und Q die Hydratationsenthalpie der exothermen Reaktion ist.

Dazu werden zwei Szenarien anhand von Laboruntersuchungen untersucht: Ein quasi-adiabatischer Aufbau innerhalb eines Kalorimeters und verschiedene klimatische Bedingungen innerhalb einer Klimakammer. Die Messgeräte sind in Abbildung 7-15 dargestellt, wobei in (a) das quasi-adiabatische Prüfgefäß ist ein Dewargefäß ist. Da ein solches quasi-adiabatisches Kalorimeter nicht ideal ist, kommt es zu einem geringen Wärmeübergang an die Umgebung, der im vereinfachten Modell durch einen Verlustterm abgedeckt wird. Im zweiten Test wird ein FreshCon-Testgerät (TTI GmbH, TGU Smartmote) als Messgefäß verwendet. Das FreshCon ist ein Gerät zur Messung der dynamisch elastisch-mechanischen Eigenschaften durch Ultraschallübertragung während des Aushärtungsprozesses von hydratisierenden Materialien wie Gips, Mörtel oder Beton (Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall -- das FreshCon-System, 2011).

symbol	description	unit
t	time variable	[h]
z	spatial variable	[m]
$\xi(t(,z))$	hydration degree (between 0 and 1)	[-]
T(t(,z))	sample temperature	$[^{\circ}C]$
ξ_{∞}	final value of reaction	[-]
A_1	hydration parameter	$[h^{-1}]$
A_2	hydration parameter	[-]
η	hydration parameter	[-]
E_a/R	activation energy and univ. gas constant	[K]
$T_{0,\mathrm{abs}}$	absolute zero temperature $(-273.15^{\circ}C)$	[K]
k	heat conduction coefficient	[W/m K]
C	heat capacity ($C = \rho c$)	$[J/m^3 K]$
Q	hydration entalphy of the reaction	$[J/m^3]$
β	convection/heat transfer coefficient	$[W/m^2 K]$
α	loss factor of calorimeter	[-]
T_u	ambient temperature	$[^{\circ}C]$

Tabelle 7.2: Überblick über verwendete Symbole und deren Bedeutung



(a) calorimeter

(b) FreshCon

Abbildung 7-15: Messsysteme: Kalorimeter (a) und FreshCon Gefäß (b)

Die beiden verwendeten Messsysteme und die Sensoren sind in Abbildung 7-17 nochmals schematisch dargestellt. Es befindet sich jeweils ein Temperaturfühler in dem Gefäß und ein Sensor misst die Umgebungstemperatur bzw. die Temperatur in der Klimakammer.



Abbildung 7-16: Schematische Beschreibung des Versuchsaufbaus

Zur Übersichtlichkeit sind in Tabelle 6.3 nochmals die Klimata wie in Kapitel 4.2.2.2 ausführlich beschrieben aufgeführt sowie die verwendete Betonrezeptur.

Tabelle 7.3: Überblick über die untersuchten Klimata (links) und Betonrezeptur (rechts)

	description	temp. [°C]	rel. humidity [%]	material	prop. [m-%]	material	prop. [m-%]
climate 1	standard climate	20	65	sand 0/2	23.2	gravel 2/5	5.8
climate 2	cold	10	65	gravel 5/8	5.8	gravel 8/11	9.7
climate 3	warm	30	65	gravel 11/16	9.7	gravel 16/22	23.2
climate 4	wet	20	85	cement CEM I	15.6	water	7.0
climate 5	dry	20	35				
climate 6	wet and cold	10	85				
climate 7	warm and dry	30	35				

Abbildung 7-17 (a) zeigt anhand der quasi-adiabatischen Messungen, dass die Betone im Mittel denselben Temperaturverlauf aufweisen und damit die Mischungen relativ einheitlich sind. In Abbildung 7-17 (b) sind im Vergleich FreshCon-Messungen in der Klimakammer dargestellt. Bei den FreshCon-Messungen wurde die Außentemperatur und Luftfeuchte variiert um verschiedene Klimata wie sie auf einer Baustelle auftreten abzubilden. In rot ist dabei eine Messung bei 30°C Umgebungstemperatur, in schwarz bei 20°C und in blau bei 10°C dargestellt. Dabei zeigt sich schön, dass die Betontemperaturen zur Umgebungstemperatur konvergieren, jedoch über die Zeit aufgrund der Wärmeerzeugung im Beton unterschiedliche Verläufe aufweisen.



Abbildung 7-17: (a) Mittlere (schwarz) und minimale bis maximale Temperaturentwicklung (grau) über alle Messungen für das quasi-adiabatische Kalorimeter im Vergleich zur Umgebungstemperatur (blau). (b) Beispielhafte Temperaturmessungen (durchgezogene Linie) für die ersten drei Klimazonen im FreshCon-Gerät im Vergleich zur Umgebungstemperatur (gestrichelt)

Anhand dieser Daten kann nun ein Gütefunktional J für eine Optimierung aufgestellt werden. In diesem Zusammenhang soll die Temperaturabweichung zwischen Messung (T_{i,meas}) und Modell (T_{i,sim}) minimiert werden:

$$J(p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (T_{i,\text{meas}} - T_{i,\text{sim}}(p))^2$$

Dabei wird über alle N Messungen gemittelt. Der zu optimierende Parametersatz p ergibt sich als

$p = \left[\xi_{\infty}, A_1, A_2, \eta, E_a/R, Q/C, \alpha_{\rm ad}/C, \alpha_{\rm fc}/C\right]$

Die Parameter ergeben sich als unbekannte Kenngrößen des zuvor aufgestellten Modells. Um ein Overfitting, also eine zu starke Anpassung der Parameter an die relativ wenigen Messungen, zu verhindern, wird eine Kreuzvalidierung durchgeführt. Dabei werden jeweils 4 Messungen als Validierungsdaten verwendet und nicht in die Optimierung mit einbezogen. Im Falle eines solchen 5-fold Cross Validation ergeben sich 5 optimierte Parametersets, welche in gestricheltem Grau in Abbildung 7-18 dargestellt sind.



Abbildung 7-18: Skalierungsfaktoren, die sich anhand der Kreuzvalidierung ergeben (grau) und die aus der Optimierung resultierenden Parameter (schwarz)

Dabei zeigt sich, dass die meisten Parameter nur eine sehr geringe Variation aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass die Optimierung hinsichtlich dieser Parameter sensitiv ist und die erhaltenen Werte sehr wahrscheinlich den optimalen Wert wiederspiegeln. Lediglich die Parameter A₁ und A₂ weisen eine größere Streubreite auf. Dies deutet darauf hin, dass das Modell hinsichtlich dieser Parameter wenig sensitiv ist oder dass mehrere Minima vorliegen. Da beide Parameter durch empirische Betrachtungen und Vereinfachungen entstanden sind, ist dies nachvollziehbar und für die Modellergebnisse weniger relevant.

Anhand der Cross Validation kann ein optimaler Parametersatz gewählt werden. Dieser ist in schwarz in Abbildung 7-18 hervorgehoben. Dass dieser Parametersatz auch tatsächlich den Temperaturverlauf des Betons abbilden kann, ist in Abbildung 7-19 verdeutlicht. Dabei ist jeweils in Rot der anhand von Literaturwerten bestimmte Temperaturverlauf dargestellt und in Grün die Ergebnisse mit dem optimierten Parametersatz. Die graue Linie stellt die tatsächlich gemessenen Werte dar und die grau gestrichelte Linie die Umgebungstemperatur. Dabei zeigt sich vor allem in den quasi-adiabaten Messungen (links), dass das optimierte Modell den Temperaturverlauf deutlich besser widerspiegeln kann.



Abbildung 7-19: Vergleich des Literatur- (rot) und optimierten Parametersatzes (grün) der Modellvorhersage (grau gestrichelt) mit der Umgebungstemperatur (grau gepunktet).

Weitere Details sowie weiterführende Analysen werden in [Skalecki et al. 2020c] diskutiert. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse, dass das gewählte makroskopische Modell für den Einsatz im Baustellenbereich geeignet ist. Dabei sind für die Baustelle und insbesondere die Prädiktion der Nachbearbeitungszeitpunkte vor allem die rechten Messungen im FreshCon-Gefäß interessant. Eine gute Prädiktion der Aushärtung während der ersten 1 h bis 20 h kann genutzt werden um einen Hinweis auf den Zeitpunkt der Nachbearbeitungsschritte zu liefern. Dazu könnte das Modell jedoch im weiteren Verlauf des Projektes noch hinsichtlich weiterer Betonkenngrößen wie z.B. E-Modul erweitert werden.

7.1.3 C1.3 - Validierung des Potentials innovativer Automatisierungskonzepte

Durch Rückmeldungen der Projektpartner sowie Gesprächen mit Baustellenarbeitern kann das Potential der Automatisierungskonzepte analysiert werden. Generell hat sich gezeigt, dass durchaus Ansätze der Digitalisierung auf der Baustelle im Gange sind und von den Baustellenbeteiligten erwünscht sind. Jedoch zeigte sich anhand von Literaturrecherche und Gesprächen auch, dass die Umsetzung von Themen der Industrie 4.0 auf einer Baustelle im Gegensatz zu Produktionslinien z.B. von Automobilherstellern zusätzliche Herausforderungen aufweist. Diese können grob drei Themen zugeordnet werden, welche sich teilweise natürlich auch gegenseitig bedingen. Zum einen ist eine Baustelle in der Regel räumlich weiter verteilt als eine Produktionsanlage in einer Halle. Zweitens gibt es in der Regel nicht eine Firma oder Institution, welche alle Maschinen und Bearbeitungsschritte durchführt, sondern es werden verschiedene Firmen mit Teilschritten beauftragt bzw. es werden Maschinen von anderen Herstellern zugekauft. Des Weiteren schränkt die teils abgelegene Lokalität die verfügbare Infrastruktur ein. Z.B. ist die Netzabdeckung mit schnellem Mobilfunkinternet in Deutschland entlang einer Autobahn nicht immer gegeben, wie sich z.B. bei der Baustelle Wittlich II gezeigt hat.

Zusätzlich tragen folgende Faktoren bzw. Herausforderungen dazu bei, dass der Aufbau von Automatisierungskonzepten im Baustellenberiech bisher noch nicht so weit fortgeschritten ist:

- Große und verteilte Systeme sind schwerer zentral zu koordinieren;
- Änderungen der Baustelleneinrichtung bzw. Bauweise (Asphalt, Beton, einlagig, zweilagig, Nachbearbeitungsschritte) führen zu vielen unterschiedlichen Setups;
- Verschiedene Auftragnehmer auf jeder Baustelle sind schwerer zu vereinheitlichen, auch hinsichtlich der Schnittstellen;

- Unzureichende Infrastruktur hinsichtlich Stromverfügbarkeit sowie GPS- und Internetverbindung erschwert die Lokalisierung und Kommunikation;
- Eine (anfängliche) zusätzliche Arbeitsbelastung für die Arbeitnehmer durch das Hinzufügen von Arbeitsschritten (z.B. Eingabe von Informationen in Onlineformulare, zusätzliche Dokumentationsschritte) wird ggf. kritisch gesehen;
- Zusätzliche Schulungen des Personals müssen ggf. erfolgen;
- Die Integration neuer Technologien braucht Zeit und funktioniert anfangs möglicherweise nicht gut; die Übertragung von Expertenwissen auf die "Intelligenz" in Systemen ist ein iterativer Lernprozess;
- Messmethoden könnten den Bauprozess verlängern (mehr Messungen, Anfangskonfiguration, ...);
- Sowie ist ggf. die Anschaffung von Zusatzausrüstung erforderlich.

Konkret hat sich auf der Baustelle Wittlich II gezeigt, dass die Bereitschaft durchaus vorhanden war, Onlineformulare auszufüllen. Jedoch ist es für den Baustellenarbeiter immer mit einer Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen verbunden. Dementsprechend wurden die Formulare in Kooperation mit OAT und Schnorpfeil so entwickelt, dass möglichst wenig neu eingetragen werden muss und vieles automatisiert eingetragen wird, wie z.B. Zeit- und Positionsstempel, oder mit den vorigen Werten vorausgefüllt ist.

In Bezug auf Telematiksysteme der Projektpartner hat sich ebenso gezeigt, dass viele Unternehmen mittlerweile eigene Systeme entwickeln und vertreiben. Dabei ist die Umsetzung solcher Systeme durchaus gewünscht, die reale Umsetzung bereitet jedoch Herausforderungen. Beispielsweise ist der initiale Aufwand relativ hoch, bis ein solches System implementiert ist, die Rückmeldung im Feldeinsatz sind jedoch durchaus positiv. Die so erfassten Daten bieten den Firmen dabei zum einen selbst eine bessere Datengrundlage, um ihr Verständnis der eigenen Maschinen zu verbessern. Dadurch können im Feld auftretende Effekte nachverfolgt werden, anstatt diese aus subjektiven Einschätzungen des Personals rekonstruieren zu müssen. Dadurch lassen sich ggf. Standzeiten, Lieferengpässe sowie die Maschinenauslastung besser beurteilen. Demgegenüber steht natürlich immer der Nutzen, der für die Wirtschaftlichkeit relevant ist.

7.1.4 C1.4 - Prozesssicherer Betoneinbau und Optimierung der Einbauqualität

Um einen prozesssicheren Einbau zu ermöglichen, wurden ausgehend von den Beobachtungen und Erfahrungen der Baustellenanalyse in AP A erste vorbereitende Maßnahmen durchgeführt.

Zur Kontrolle der Betonoberfläche wurden von Wirtgen und Lehmann und Partner am Fertiger bzw. am Versuchsstand in Aachen verschiedene Konzepte zur Bestimmung der Oberflächentextur analysiert und teilweise erprobt. Erste Erkenntnisse sind dabei in AP B3.2 dargestellt. Ziel ist es eine zuverlässige Oberflächenebenheitsmessung direkt am oder hinter dem Fertiger zu erhalten. Dadurch kann im realen System frühzeitig auf eventuelle Abweichungen reagiert werden und diese im noch frischen Beton ggf. korrigiert werden, was bei einer nachträglichen Befahrung der fertigen Fahrbahn nicht mehr möglich ist.

Da auf den Baustellen verschiedene Messsysteme von verschiedenen Partnern zum Einsatz kommen, ist es wichtig diese auch gegeneinander zu georeferenzieren. In diesem Zusammenhang wurden auf den Baustellen verschiedene Konzepte erprobt, um geostationäre Punkte zu erhalten, welche in allen Koordinatensystemen eindeutig sind. Beispielsweise wurden dazu Boxen am Straßenrand aufgestellt, welche in allen Koordinatensystemen auftauchen. Diese wurden durch den Vermesser von Schnorpfeil mit eingemessen sowie durch den Fertiger und die Befahrung durch L+P miterfasst. Dadurch können relative Abweichungen zwischen den Koordinatensystemen verringert werden. Erste Tests erfolgten dazu bereits und werden ausgewertet.

Auf der anderen Seite ist die Abstimmung zwischen Mischanlage, Fertiger und Nachbearbeitung ein zentrales Thema um den Materialfluss abzubilden sowie auf Störungen oder Materialveränderungen zu reagieren. Neben der telefonischen Abstimmung zwischen Fertiger und Mischmeister, wie sie meist erfolgt, wurde dazu in einem ersten Schritt eine Dokumentation über Onlineformulare wie in AP C3.3 beschrieben an der Baustelle Wittlich II erprobt. Dieses System soll für die kommenden Baustellen schrittweise adaptiert und verbessert werden.

7.2 ARBEITSPAKET C2 – REGELUNG UND QUALITÄTSKONTROLLE

Die Vernetzung der am Herstellungsprozess beteiligten interagierender technischen Anlagen und Apparaturen im Sinne der Betonfahrbahnherstellung 4.0 muss das Ziel der Steigerung der Qualität und Dauerhaftigkeit adressieren. In diesem Kontext müssen Daten der in Arbeitsschwerpunkt B entwickelten Methoden zur Erfassung der Oberflächenqualität und der rheologischen Eigenschaften systematisch aufbereitet werden, um zielgerichtet die Prozessdaten zu optimieren.

7.2.1.1 AP C2.1 LWS4 für Schnorpfeil Doppelanlage

Durch die Integration des Liebherr Messverstärkers LWS4 in die Schnorpfeil Doppelanlage können nun Live-Daten des Mischprozesses, wie auch an der IWB Technikums Anlage über OPC ausgelesen und analysiert werden.

7.2.1.2 AP C2.1 Zentraler Leitstand für Schnorpfeil Doppelanlage

Die Schnorpfeil Doppelanlage wurde im Rahmen des Projektes um einen Zentralen Leitstand erweitert. Dieser erlaubt es beide Anlagen aus einem zentralen Auftragsmanagment System zu steuern. Neben der Entlastung des Mischmeisters und einer Verbesserten Bedienung, können so die Vergabe einheitlicher Chargen und Auftragsnummern aus beiden verkoppelten Anlagen gewährleistet werden. Dies ermöglicht den zentralen Datenabgleich für die in C3.3 umgesetzte Integration der Mischanlage in den Verbund des B4.0 Leitsystems.



Abbildung 7-20: Zentraler Leitstand für Schnorpfeil Doppelanlage

7.2.2 C2.1 - Auswertung und Aufarbeitung der Daten für die Prozessleitebene

In einem ersten Schritt müssen die Daten, welche auf den Baustellen erhoben werden, sinnvoll verarbeitet, synchronisiert und gruppiert werden. Nötige Anpassungen und Anforderungen zur Synchronisation sind dabei in AP A1.7 beschrieben.

Sobald die Daten in einer sinnvoll definierten Abtastrate und Qualität vorliegen, müssen diese soweit aufbereitet werden, dass diese in eine gemeinsame Datenstruktur auf der Prozessleitebene überführt werden können. Dazu wurden alle wichtigen Datenquellen ihrer "Position" in der Prozesskette wie in AP C1.1 beschrieben zugeordnet. Um Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Datenquellen zu identifizieren sowie eine sinnvolle Datenverarbeitung zu ermöglichen wird ein Entity-Relationship-Modell (ERM) aufgebaut. Ein erster Entwurf dafür ist in Abbildung 6.20 dargestellt und wurde vom ISYS im Rahmen einer internationalen Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [Skalecki et al. 2020b]. Ein ERM bildet dabei ein semantisches bzw. grafisches Datenmodell, welches die Beziehungen zwischen einzelnen Objekten, in diesem Fall die Beziehung von verfügbaren Daten zu einzelnen Prozessen bzw. Objekten, beschreibt.



Abbildung 7-21: Datenmodell eine Betonbaustelle und Synchronisation [Skalecki et al. 2020b]

Dazu werden die erfassten Daten zunächst der übergeordneten "Domäne" zugeordnet, in der sie erzeugt wurden. In diesem Sinne werden tatsächliche Messdaten, die im Zuge der Betonmischung/Charge erzeugt wurden (Mischerdaten) bzw. in Beziehung zu einer Charge stehen (Transportdaten), als "batch related", also chargenbezogene Daten klassifiziert. Analog dazu werden Messdaten, welche einer Einbauposition zugeordnet werden können (z.B. Fugenschnitte, Oberflächenscans), als "position related", also positionsbezogen klassifiziert. Der dritten Kategorie der baustellenbezogenen Daten werden generelle Informationen zur Verfügbarkeit von Maschinen und Rezepten zugeordnet.

Zeitlich betrachtet entstehen Daten zunächst mit der Produktion einer Betoncharge (concrete batch). Erfasste Daten sind dabei z.B. Maschinenparameter der Mischanlage sowie Einwaagegrößen, Mischzeit, Leistung und Feuchtegehalt. Eine Betoncharge ist dabei einer Mischanlage und einem Rezept zuzuordnen. Auf der anderen Seite ist eine Mischanlage mehreren bzw. beliebig vielen (durch * gekennzeichnet) Betonchargen zuzuordnen, nämlich allen in dieser Mischanlage produzierten. Eine gewisse Anzahl N an Betonchargen werden zu einer Transportcharge (dumper batch) zusammengefasst. Auf der Baustelle Köln-Wahn wurden z.B. jeweils 4 Chargen pro LKW transportiert. Jedes Transportfahrzeug fährt einen zuvor beschriebenen Kreislauf ab und wird deswegen einem Kreis (circle) zugeordnet. In diesem Objekt Kreis sind die Zeitstempel und Informationen des Transportvorgangs hinterlegt. Eine wichtige Schnittstelle bildet der Übergang von einer Transportcharge zur eingebauten Fahrbahn. Hierzu wird ein virtuelles Einbausegment (pavement segment) definiert. Eine Transportcharge wird dabei eindeutig einem Einbausegment zugeordnet. Dabei wird dem Einbausegment eine (GPS-)Position zugeordnet sowie deren Form und Materialverbrauch durch die Breite des verwendeten Fertiger und die Schichtdickte festgelegt. Jedem Segment werden dann wiederum Fertigerdaten und Daten der einzelnen Nachbearbeitungsschritte zugewiesen. Darin werden Maschinen- und Bearbeitungsdaten wie z.B. Rüttelenergie, Geschwindigkeit und Bearbeitungsschritt aber auch Synchronisationsdaten wie Zeitstempel und Position abgespeichert.

Zuletzt müssen weitere Datenquellen wie z.B. generelle Rohmaterialdaten, manuell erfasste Qualitätsbewertungen und Frisch- bzw. Festbetondaten integriert werden. Dies erfolgt in diesem Zusammenhang durch die gestrichelt gekennzeichneten Objekte. Chargentests (batch tests) beschreiben Eigenschaften der erhobenen Frisch- und Festbetonmessungen. Positionsbezogene Tests (position tests) beziehen sich auf Messungen der Fahrbahn wie z.B. gezogene Bohrkerne oder einzelne Oberflächentests. Kontinuierlich über die gesamte Fahrbahn ermittelte Daten wie z.B. Oberflächenscans oder Geräuschmessungen werden getrennt betrachtet (continuous tests). Zusätzlich stehen eventuell Messungen zu den Eigenschaften der Rohmaterialien oder Umgebung (z.B. Wetterdaten) zur Verfügung.

Insgesamt kann das erstellte Datenmodell damit einzelne Messungen gruppieren und bildet den ersten Schritt um daraus ein Datenbankmodell zu entwickeln, welches für eine Prozessleitebene benötigt wird. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass alle relevanten Daten erfasst werden können und für den effizienten Zugriff sowie weitere Analysen systematisch abgelegt werden. Es wurde immer auf eine gute Vernetzung der integrierten Maschinen, Sensordaten und manuellen Qualitätssicherungsdaten geachtet.

7.2.3 C2.2 - Integration aller entwickelten Sensorkonzepte in die Prozessleitebene

Die Integration der Sensorkonzepte baut auf den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen auf und wurde daher zum aktuellen Projektstand nur teilweise adressiert, da für einige innovativen Messtechniken die Arbeiten im vollen Gange sind. Deshalb wurde bei dem Aufbau der Applikationsplattform auf eine hohe Flexibilität geachtet. So können mit einfachen Methoden neue Schnittstellen aufgebaut werden. Da die aktuell sinnvoll zur Verfügung stehenden und aufbereiteten Daten sich noch in einem handhabbaren Rahmen befinden, muss die Datenbasis nicht reduziert werden.

Die geplante innovative Messtechnik zur Integration in die Applikationsplattform der zentralen Prozessleitebene ist die integrative Ebenheitsmesstechnik am Fertiger. Aktuell ist diese über das Wirtgen Telematiksystem integriert, da die Datenauswertung und -aufbereitung über die Steuerung des Fertigers läuft. Diese Schnittstelle ist in das Prozessleitsystem integriert und im Rahmen der Demonstrationsbaustelle validiert.

7.2.4 C2.3 - Optimierung des Betoneinbaus unter Berücksichtigung rheologischer Eigenschaften des Betons

Um die rheologischen Eigenschaften des Betons, welche über die innovative Senorkonzepte erfasst werden soll, ist es wichtig den Materialfluss über die Prozesskette zu verfolgen. Somit müssen georeferenzierte Trajektorien in den einzelnen Teilprozessschritten geplant und zentral verarbeitet im Prozessleitsystem werden. Dazu werden entsprechende Informationen in den Schnittstellen übertragen. Näheres hierzu wird in Abschnitt 7.3.1 vorgestellt.

7.2.4.1 Georeferenzierte Trajektorienverarbeitung in der Materiallogistik

Das Bindeglied zwischen der Betonherstellung und dem Einbau auf der Baustelle ist die Materiallogistik. Dazu ist nicht die genaue Position der Fahrzeuge relevant, sondern wie in dem Datenbankmodell gekennzeichnet die Rundeninformation der Fahrzeuge. Diese kann manuell erfasst werden, jedoch ist dies mit erheblichem Aufwand verbunden. Daher wurde eine Schnittstelle in das Prozessleitsystem integriert, welche zyklisch die Position der Fahrzeuge erhält. Auf dieser Information kann anhand von GeoFences die Rundeninformation extrahiert werden.



Abbildung 7-22: GeoFences in dem Prozessmodell für die Materiallogistik.

Anhand des Modells zur Simulation der diskreten Prozessabläufe in Abschnitt 7.1.1.1 kann die rekonstruierbaren Positionen identifiziert werden. In Abbildung 7-22 ist der relevante Ausschnitt gezeigt, sowie die Position der GeoFences als gestrichelte Boxen eingezeichnet. Ein Zustandsübergang wird erkannt, wenn das Fahrzeug das GeoFence überschreitet. Dies ist in der Abbildung erkennbar durch Pfeile, welche über die gestrichelten Boxen geht. D.h. es können mit diesem Ansatz nicht alle Stationen automatisiert erfasst werden. Die Stationen Wait und Load, sowie Wait und Dump sind nicht unterscheidbar. Eine Visualisierung der GeoFences und die Position der erfassten LKWs ist in Abbildung 7-23 dargestellt. Weiter wurde für die gezeigte Baustelle die Rundentabelle eines LKW und Tages gezeigt. Diese wurde auf Basis der GPS-Positionen und GeoFences erstellt.



rounds	at_plant	to_paver	at_paver	to_plant
1	6:49	7:17	7:29	7:33
2	7:45	8:06	8:18	8:21
3	8:34	8:45	9:01	9:03
4	9:15	9:35	9:49	9:51
5	10:03	10:12	10:26	10:28
6	10:40	10:52	11:06	11:08
7	11:19	11:29	11:41	11:43
8	11:55	12:09	12:22	12:24
9	13:15	13:32	13:45	13:48
10	13:59	14:15	14:28	14:29
11	14:40	15:01	15:14	15:16
12	15:28	15:57	16:09	16:11

Abbildung 7-23: Kartendarstellung der GeoFences und Fahrzeugpositionen.

7.2.4.2 Aufbereitung der georeferenzierten Daten der Maschinenschnittstellen

Die Georeferenzierung der Maschinendaten auf der Baustelle erfolgt mit GPS Sensoren in globalen Koordinaten. Jedoch werden alle Daten, welche durch das Personal auf der Baustelle erhoben werden, üblicherweise bezüglich eines linearem Referenzsystems erfasst, die Stationierung oder Kilometrierung. Um eine gute Vergleichbarkeit der maschinell erfassten Daten zu gewährleisten müssen diese ebenfalls in das lineare Referenzsystem umgerechnet werden.



Abbildung 7-24: Prinzip der linearen Referenzierung.

Unter der linearen Referenzierung versteht man die Umrechnung eines mehrdimensionalem Koordinatenpunktes auf eine eindimensionale Koordinate. Dazu wird als Basis eine Referenzkurve im Raum genutzt und die Länge der Kurve wird als Koordinate interpretiert. Die Transformation einer der Koordinate vereinfacht sich somit auf die Bestimmung des nächsten Punkt auf der Kurve. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abbildung 7-24 dargestellt und es wird die 2D Koordinate [X,Y] auf die lineare Koordinate L abgebildet. In unserem Fall sollen zweidimensionale GPS Koordinaten (lat/lon oder east/north) auf die Baustellenstation umgerechnet werden. Dazu werden die Planungsdaten der Maßnahme genutzt. Ebenfalls anhand dieser Daten wird die Referenz der Gleitschalungsfertigers gesteckt und die Stationstafeln auf der Baustelle aufgestellt. Somit kann das Personal relativ einfach sich auf der Baustelle zurechtfinden und entsprechende Beobachtungen und Messungen georeferenzieren sowie die Maschinendaten einfach interpretieren.



Abbildung 7-25: Anwendung des linearen Referenzsystems auf die GPS Positionen der mobilen Maschinen und Vergleich zu den erfassten Nachbearbeitungsprotokollen für eine Tagesleistung.

In Abbildung 7-25 ist beispielhaft die Anwendung der linearen Referenzierung auf die GPS Positionen des Fertigers sowie für die Nachbearbeitungsmaschinen. Zusätzlich sind die Protokolle, welche im Rahmen der Baustellendokumentation erfasst wurden, dargestellt. Wie an der Kurve für die Sprühbühne und den Datenpunkten für die Sprühprotokollen in Rot gut zu erkennen ist, funktioniert die lineare Referenzierung gut. Die anderen Protokolle sind in Bezug auf den Zeitstempel nicht zum direkten Vergleich zu verwenden, da durch die Durchführung von Tests sowie durch den zeitlichen Ablauf der Baustelle nicht immer exakt dem Bearbeitungszeitpunkt entsprechen.

7.2.4.2.1 Aufbau eines neuen linearen Referenzsystems auf Basis von GPS-Daten

Da nicht auf jeder Baustelle genaue Vermessungsdaten allen Teilnehmern zur Verfügung stehen ist es interessant ein eigenes Referenzsystem anhand von GPS Messungen aufzubauen. Insbesondere ist dies für die Nachbearbeitung der Fall. Dazu wurde konzeptionell ein Vorgehen auf Basis der GPS Daten der Sprühbühne entwickelt und gegen das Referenzsystem der Baustelle verglichen.

Im Rohformat besteht der Beispieldatensatz der Sprühbühne der betrachteten Baustelle aus 7678 Datenpunkten, welche eine Länge von ca. 23,4 km aufweisen. In Realität hat die Baustelle 5,4 km. D.h. dass die Daten im Rohformat noch Effekte wie Rauschen hervorgerufen durch GPS Wandering enthalten. Außerdem kann die Zahl der Stützpunkte deutlich reduziert werden. Hierzu werden die beiden Koordinaten einzeln Tiefpassgefiltert. Somit ergibt sich bereits eine Länge von ca. 5,5 km, was schon fast der Realität entspricht. Der gefilterte Verlauf enthält noch Effekte, welche für einen Fahrbahnverlauf nicht plausibel sind. Durch das Ein- und Ausfahren der Sprühbühne zu Schichtbeginn und -ende treten Schleifen oder S-Kurven auftreten auf. Weiter besteht dieser Verlauf noch aus sehr vielen Datenpunkten. Bei Anwendung des Ramer-Douglas-Peucker Algorithmuses zur Reduktion der Punkte und Bereinigung der Schleifen und S-Kurven verringert sich die Zahl der Datenpunkte von 7678 auf 30 Stützpunkte. Die Länge der Kurve wird ebenfalls auf die Länge der Baustelle aus den Vermessungsdaten verringert.



Abbildung 7-26: Vorgehen zum Aufbau des Referenzsystem auf Basis der Sprühbühnenposition.

In Abbildung 7-26 ist dieses Vorgehen dargestellt. Von links nach rechts sind die Vermessungsdaten (blau), die Rohdaten der Sprühbühne (orange), das Ergebnis der Tiefpassfilterung (grün) und das Ergebnis der Reduktion (rot). Alle Linien sind um 200m nach Osten verschoben. Generell ist eine gute Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis des Vorgehens und den Vermessungsdaten zu erkennen.



Abbildung 7-27: Fehler zwischen Vermessung und selbst erstelltem Referenzsystem.

Die Abbildung 7-27 zeigt den Fehlerverlauf über die Stationierung der Vermessungsdaten und wird über den Abstand der Station in UTM Koordinaten alle 5 m bestimmt. Der Fehler ist am Anfang kleiner 2 m und steigt bis zum Ende der Baustelle auf bis fast 10 m an. Dies wird durch eine Verzerrung hervorgerufen, da das vorgestellte Vorgehen die Tendenz hat im Inneren von Kurven zu verlaufen. Somit überschätzt das selbst erstellte Referenzsystem die Strecke. In den Detailbildern ist diese Situation gezeigt. Die blaue Linie repräsentiert die Vermessungsdaten und die Orange das selbst erstelltem Referenzsystems. Mit schwarzen Linien sind die zwei Referenzsystem alle 5 m verbunden und ist gleichzeitig der Fehler. Auf der linken Seite ist die Situation am Anfang der Baustelle zu sehen und rechts am Ende.

7.3 ARBEITSPAKET C3 – INTELLIGENTE VERNETZUNG UND KOMMUNIKATION

Die intelligente Herstellung einer Betonfahrbahn 4.0 erfordert den Austausch an Informationen der beteiligten technischen Apparaturen als auch Maschinen. Insbesondere durch die charakteristischen Eigenschaften der Fahrbahnbetone (Grünstandfestigkeit, Schwindmaß) gilt es, neben der reinen Prozessablauf-basierten Vernetzung und Kommunikation, die rheologiebasierte Prozesssteuerung und Regelung entwickeln.

Dazu werden in diesem Kapitel die Anforderungen an den hard- und softwareseitigen Aufbau der Applikationsplattform des zentralen Prozessleitsystems und die Integration der Prozessteilnehmer sowie der innovativen Sensorkonzepte definiert und sukzessive realisiert.

7.3.1 C3.1 - Entwicklung einer modellbasierten Prozessüberwachung der rheologischen Eigenschaften der Werkstoffe

Für die intelligente Herstellung von Betonfahrbahnen ist der automatisierte Austausch von Informationen elementar. Dabei gilt es neben der Entwicklung eines zentralen Leitstands auch die Schnittstellen zu den einzelnen Teilschritten in den bestehenden Prozessablauf sowie auf Maschinenebene minimalinvasiv zu integrieren. Hierbei werden auf Basis der Erkenntnisse der Baustellenanalysen und der vorherigen Entwicklungen im Folgenden die zu verarbeitenden Daten in Gruppierungen eingeteilt und die Anforderungen an die Applikationsplattform des zentralen Prozessleitsystems abgeleitet.

Die erste Gruppierung sind die *funktionellen Daten*. Hierzu zählen alle notwendigen Mess- und Kenngrößen, welche für den Aufbau den Aufbau einer gemeinsamen Datenbasis unabdingbar sind, da diese den Bezug aller erhobenen Daten untereinander herstellen. Somit ist das Ziel der *funktionellen Daten* das Abbilden des Baustellenablaufs und der Materialflüsse. Das heißt, diese Gruppierung baut die Chargen-volumetrische-Orts-korrelation auf. Dazu werden in allen Teilschritten die entsprechenden Daten erhoben und sind in Tabelle 7.4 gegeben. Dabei ist die letzte Zeile gesondert dargestellt. Hier wird in der Betonherstellungsspalte die Chargen ID definiert, auf welche sich die Spalten Transport und Qualitätssicherung wieder beziehen können. Des Weiteren wurde an dieser Stelle auf die genaue Aufschlüsselung der Logistikkette in einzelne Fahrzeuge verzichtet, da diese für die qualitätsbezogenen Untersuchungen im Rahmen des Projektes eine untergeordnete Rolle spielen. Anhand dieser Gruppierung können auch die ersten Rückschlüsse auf den reibungslosen Baustellen-ablauf gezogen werden.

Betonherstellung	Transport	Einbau	Nachbearbeitung	Qualitätssicherung
ZeitstempelVolumen	 Zykluszeitpunkte Volumen 	 Zeitstempel Eingebautes Volumen 	 Zeitstempel 	 Zeitstempel
• Chargen ID	• Chargen IDs	 Position 	 Position 	PositionChargen ID

Tabelle 7.4: Funktionelle Daten.

Die zweite Gruppierung stellen die *Daten zur Qualitätsanalyse* dar. Hierbei handelt es sich um die Größen, welche zur (Qualitäts-) Dokumentation im Prozess anfallen, über die Maschinen automatisiert erfasst werden können oder zu Analysezwecken gesondert erhoben werden. Die Kernparameter, welche im Prozessleitsystem erfasst und ausgewertet werden sollen, sind in Tabelle 7.5 gegeben. Die Parameter sind nach den verschiedenen Teilschritten gegliedert. Die Datenerfassung der Betonherstellung und des Einbaus, kann bereits automatisiert erfolgen, da die entsprechenden Anlagen und Maschinen einen hohen Automatisierungsstandard besitzen. Die Nachbearbeitung und Qualitätssicherung soll aktuell noch manuell über entsprechende Formulare erfolgen, da hier die Datenerhebung zum Großteil noch durch manuelle Beprobung (Bestimmung der Frischbetoneigenschaften) und z.T. Einschätzung des Baustellenpersonals (Bürst-/Schnittbeginn) erfolgt. Dabei sind die Parameter, welche in der Tabelle 7.5 gegeben sind, bisher noch vorläufig und werden ggf. im weiteren Verlauf des Projektes angepasst und erweitert.

Tabelle 7.5: Daten zur Qualitätsanalyse.

Betonherstellung	Transport	Einbau	Nachbearbeitung	Qualitätssicherung
 Status Anlage Einwaagen Feuchte Mischzeit Rheologische Parameter Betontemperatur 	• Transportdauer	 Status Fertiger Geschwindigkeit Schichtdicke Verdichtung Ebenheit Einbau Temperatur Nutzereinschätzung 	 Festigkeit Temperatur (-ent-wicklung) Zeit nach Produktion 	 Frischbetonei- genschaften Festbetoneigen- schaften Ebenheit Witterung Nutzereinschät- zung
Maschinelle Daten		Maschinelle Daten	Manuelle Daten	Manuelle Daten

Mit diesen Daten wird sichergestellt, dass zum aktuellen Stand des Projektes und nach Kenntnis des ISYS, alle relevanten Daten für die Teilmodelle und Qualitätsanalysen integriert werden können. Daraus leiten sich für die Applikationsplattform des zentralen Prozessleitsystems folgende Schnittstellenanforderungen zur online Erfassung der relevanten Daten ab

- Schnittstelle zum Erfassen der Chargenprotokolle (digitale Lieferscheine, Abschnitt 7.3.3.2)
- Schnittstelle zum Erfassen der Position der Fahrzeuge aus der Materiallogistik
- Schnittstelle zum Erfassen der Einbauparameter und -messwerte
- Schnittstelle zum Erfassen der Position aller Nachbearbeitungsmaschinen (Abschnitt 7.3.3.5)
- Schnittstelle zum Erfassen der manuellen Kenngrößen (online Formulare, Abschnitt

Im weiteren Verlauf werden weitere Schritte zum Datenmanagement und der genauere technische Aufbau der Applikationsplattform sowie deren Schnittstellen zu den Anlagen, Maschinen und Benutzer erläutert.

7.3.2 C3.2 - Softwareentwicklung für raumbezogene Aufgaben und Prozesse

Üblicherweise fallen die Daten in unterschiedlichen Domänen wie zeit-, chargen- oder positionsbezogen, an. Dies ist bei der Erhebung der Messdaten (vgl. Meilenstein 1: Lastenheft) sowie deren Analyse berücksichtigt worden. Dennoch ist es nicht möglich alle Bezugsgrößen gleichzeitig zu erfassen. Daher sind Algorithmen zur Korrelation der verschiedenen Domänen notwendig damit eine ganzheitliche Bewertung von raumbezogenen Aufgaben und Prozessen ermöglicht wird. Hierzu wurden bereits erste Algorithmen zur Charakterisierung raumbezogener Aufgaben und Prozesse entwickelt worden.

Ein Beispiel für einen solchen Algorithmus ist die Rekonstruktion der Transportdauer auf Basis des Vergleichs zwischen dem produzierten und verbrauchten Volumen an Beton in Abschnitt 5.1.7.3.

Durch die systematische Entwicklung des Datenbanksystems und der Definition der *funktionellen Daten* wird bereits ein wesentlicher Beitrag zur Datenfusion beigetragen. Somit soll sichergestellt werden, dass zum Zusammenführen alle wichtigen Größen bekannt sind und diese auch erfasst werden. Dies soll es ermöglichen im weiteren Verlauf chargenbasierte Parameter, wie beispielsweise eine rheologische Kenngröße aus dem Mischprozess mit georeferenzierten Kennwerten aus der Fertigung oder Qualitätsanalyse, wie beispielsweise Ebenheitsparametern, zu vergleichen. Ein wichtiger Schritt zur Analyse stellt die Referenzbaustelle Wittlich II dar, bei der, sofern dies möglich war, immer alle *funktionellen Daten* miterfasst wurden. Zum aktuellen Zeitpunkt befinden sich die Daten noch beim Zusammenführen zur Erstellung einer einheitlichen Datenbasis, da das zentrale Prozessleitsystem sich noch im Aufbau befindet und daher nur teilweise eingesetzt werden konnte. Auf dieser Datenbasis wird dann die Güte der aktuellen Synchronität der Daten untersucht. Bei Bedarf werden weitere Schritte zur Optimierung der Datenfusion unternommen.

Die Definitionen und Implementierungen zum Aufbau der Datenbasis, sowie die Inhalte der einzelnen Daten werden im Kapitel 7.3.3 genauer dargestellt. Damit sollen über die Applikationsplattform des zentralen Prozessleitsystems automatisiert auf der Baustelle erfasst und zusammengeführt werden. Die Erprobung und Validierung der einheitlichen Datenbasis erfolgte auf dem ersten Demonstrator A1 Wittlich-Hasborn. Die Ergebnisse sowie eine Beschreibung der Herangehensweise sind dem vorangegangenen Abschnitt zu entnehmen.

Die Definitionen und Implementierungen zum Aufbau der Datenbasis, sowie die Inhalte der einzelnen Daten werden im Kapitel 7.3.3 genauer dargestellt. Damit sollen über die Applikationsplattform des zentralen Prozessleitsystems automatisiert auf der Baustelle erfasst und zusammengeführt werden.

7.3.3 C3.3 - Integration der Teilmodelle in das Gesamtkonzept – Prozessleitebene

Derzeit befindet sich die Applikationsplattform für den zentralen Leitstand am ISYS im Aufbau. Hierzu sind verschiedene Arbeiten im Gange, welche in diesem Abschnitt detailliert vorgestellt werden. Es wird zunächst der konzeptionelle und technische Aufbau der Soft- und Hardwareinfrastruktur vorgestellt. Dann werden die Schnittstellen zu der Mischanlage und dem Gleitschalungsfertiger aufgebaut und abschließend wird die Integration der manuell zu erfassenden Daten gezeigt.

Ziel der Applikationsplattform "zentraler Leitstand" ist es eine Prozessüberwachung zur Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität der Prozesskette "Betonfahrbahnherstellung" aufzubauen. Dazu wurde ein Konzept zur Datenakquise, -speicherung und -aufbereitung durch das ISYS erstellt und auf den Arbeitsgruppentreffen sowie mit den Projektpartnern diskutiert.

Hierfür stehen neben der Definition der Schnittstellen und Austauschformen noch weitere Anforderungen im Vordergrund. Es müssen demnach nicht nur Daten ausgetauscht, sondern auch gespeichert, aufbereitet und präsentiert werden. Zwar kann im Rahmen des Forschungsvorhabens vereinfachend angenommen werden, dass immer die gleichen Rahmenbedingungen herrschen, wie beispielsweise der eingesetzte Maschinenpark. Jedoch soll zumindest bzgl. der verwendeten Softwarearchitektur die Möglichkeit bestehen flexibel auf neue Anforderungen reagieren zu können. Darüber hinaus wird noch eine weitere Sicherheitsebene über ein VPN Netz realisiert damit die Projektdaten nicht einfach zugänglich aus dem öffentlichen Internet erreichbar sind. In Abbildung 6.21 ist ein Entwurf der Anforderungen des zentralen Leitsystems für die Gesamtbaustelle gegeben. Dabei gilt es zu beachten, dass noch nicht alle Schnittstellen definiert sind und sich die Struktur grundsätzlich ändern kann. Die große Wolke in der Mitte repräsentiert das Internet und spiegelt die örtliche Verteilung einer Baustelle wider. Oben links ist das zentrale Leitstands-System dargestellt. Weiter sind alle anderen Prozessteilnehmer schematisch dargestellt und sollen über die zwei VPN Netze über den Leitstand miteinander Informationen austauschen. Die Mischanlage und der Fertiger werden direkt über Maschinenschnittstellen integriert. Durch die Tablets wird ein Zugriff per Webbrowser auf die Visualisierung zur Dateneingabe/ausgabe dargestellt und somit werden die verschiedenen manuell zu erfassenden Datenquellen integriert. Zum aktuellen Projektstand ist die Überwachung der einzelnen Logistikteilnehmer noch nicht genauer spezifiziert und nicht final geklärt, ob eine detaillierte Information über die Logistikteilnehmer im Rahmen der Qualitätsüberwachung einen Mehrwert im Vergleich zur materialflussbasierten Rekonstruktion bringen.



Abbildung 7-28: Erster Entwurf der Architektur und des Datenaustauschs für ein zentrales Prozessleitsystem.

Aus diesen Anforderungen leiten sich die offensichtlichen Aufgaben wie das Aufsetzen einer zentralen Datenbank, eines Webservers zur manuellen Dateneingabe sowie zur Visualisierung der Daten und der Schnittstellen APIs der Maschinenebene ab. Aber es werden auch einige weitere Schritte notwendig, um diese Aufgabe im Kontext des verteilten Zugriffs aus dem Internet über ein VPN zu ermöglichen. Damit muss die Architektur der Applikationsplattform noch sämtliche Aufgaben aus dem Bereich der Netzwerktechnik übernehmen, damit die Kommunikation aller Teilnehmer stattfinden kann. Hierzu zählen das Realisieren der Aufgaben des Routings zwischen verschiedenen Netzwerken, eine Firewall zur Verbindungszugriffsverwaltung vom öffentlichen Internet und innerhalb des eigenen Netzwerks sowie das Aufsetzen der zwei verschiedenen VPN Dienste. Die zwei VPN Dienste sind notwendig, damit zum einen alle Baustellenteilnehmer die Möglichkeit haben per App in das Baustellennetz zu gelangen und zum anderen die Schnittstelle zu der Wirtgen Telematik einfach in deren Infrastruktur integriert werden kann. Durch den raschen Wandel des Anforderungskatalogs während der Laufzeit des Projektes musste das Konzept mehrere Male angepasst und erweitert werden. Hierbei wurde bei der Erprobung auf einem einfachen Server (Betriebssystem) zusammen mit einer Industriesteuerung (Abschnitt 7.3.4.1) gestartet. Diese Architektur musste durch die vorhergenannten Anforderungen jedoch angepasst werden. Da diese Herangehensweise an ihre Grenzen gestoßen ist, musste ein auch dieses einfache Setup erweitert werden. Hierfür eignen sich Virtualisierungslösungen besonders gut, da diese eine hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit durch Kapselung der Einzelanforderungen in virtuelle Maschinen (VMs) oder Container erlauben. Darüber hinaus lassen sich virtualisierte Systeme besonders gut auf neue Hardware portieren oder bei gewachsenen Leistungsanforderungen einfacher skalieren.

Im weiteren Verlauf des Kapitels kann eine genauere Beschreibung des derzeitigen Standes des technischen Aufbaus der Applikationsplattform dem Abschnitt 7.3.3.1 entnommen werden. Die Realisierung der Schnittstellen auf Maschinenebene ist in Abschnitt 7.3.3.2 (Mischanlage) bzw. 7.3.3.3 (Fertiger) sowie die Webschnittstelle zur manuellen Datenerfassung in Abschnitt 7.3.3.4 beschrieben.

7.3.3.1 Implementierung und technische Details der Applikationsplattform

In diesem Abschnitt werden die technischen Details der Implementierungen der Applikationsplattform des Prozessleitsystems vorgestellt.



Abbildung 7-29: Desktop Computer zum Hosten der virtuellen Infrastruktur.

Die Applikationsplattform wird auf einem Desktop Computer aus dem Bestand des ISYS implementiert, welcher eine Standardausstattung mit einem Intel i5 Prozessor, 8 GB RAM und einer 500 GB SSD besitzt. In Abbildung 7-29 ist der verwendete Computer dargestellt. Ein solcher Computer ist für die experimentelle Erprobung mit gegebenen Anforderungen ausreichend. Sollte man das folgende Software Setup für einen Produktiveinsatz ausrollen wäre es jedoch sinnvoll auf ein professionelleres System zurückzugreifen. Dies hat einige Vorteile, welche den stabilen und sicheren Einsatz fördern. Beispielsweise erhöht ein professioneller Speichercontroller zusammen mit mehreren Festplatten deutlich die Datensicherheit und vermindert somit die Gefahr von Datenverlusten und Ausfällen.

Durch den raschen Wandel der Anforderungen an die Applikationsplattform ist es notwendig eine Virtualisierungsebene einführen. Somit kann durch die Modularität die notwendige Flexibilität gewährleistet werden. Hierzu wurde mit dem Betriebssystem Proxmox Virtual Environment eine entsprechender Hypervisor aufgesetzt. Auf diesem Hypervisor wird die virtuelle Infrastruktur realisiert.



Abbildung 7-30: Aufbau der Architektur des Prozessleitsystems.

In Abbildung 7-30 ist schematisch die zum aktuellen Stand realisierte Architektur dargestellt, wobei die große Box den echten Hypervisor Computer repräsentiert. Die kleinen Boxen sind Virtuelle Maschinen (@EMU) oder Container (LXC), welche auf dem Hypervisor laufen. Die kleinen Boxen außerhalb des Hypervisors sind die VPN Client Systeme (OPENVPN) des VPN Baustelle Netzes. Die kleinen LAN oder WAN Kästen stellen Netzwerkanschlüsse dar. Die farbigen Linien repräsentieren die verschiedenen realisierten Netzwerke, wobei das grüne Netz das Hauptnetz der Applikation darstellt und das orangene das Benutzernetz der VPN Clients des Baustellen VPNs ist. Die Telematikschnittstelle seitens Wirtgen wurde über eine weitere VPN Technologie () integriert und gliedert sich in das Hauptnetz der Applikation direkt ein. Das blaue Netz ist die NAT Verbindung in das Internet, damit die Firewall bzw. der Router systematisch die Ports der öffentlichen Dienste weiterreichen kann. Die Firewall/Router hat die Aufgabe genau diese Netze und VPN Verbindungen zu verwalten. Weiter sollen die allgemeinen Nutzer nur auf die für Ihn bestimmten Dienste zugreifen und somit werden entsprechende Regeln definiert. Dies alles geschieht mittels der für diese Zwecke optimierten open source Firewall/Router Distribution pfSense, welche ein umfangreiches Webinterface zum Verwalten und Konfigurieren bietet.

Die eigentliche Applikation besteht aus den drei Containern Webserver (produktiv), Datenbank und Fertiger API. Hierbei wurde zu Erprobungszwecken (devel.) eine Kopie des Webservers (produktiv) angelegt, um während der Baustellenerprobungen parallel Weiterentwicklungen der Implementierungen der Webschnittstelle zur Erfassung manueller Daten vorantreiben zu können. Die Logos der eingesetzten Technologien hierfür können aus der Abbildung 7.30 entnommen werden. Der Datenlogger, welcher durch Liebherr entwickelt wurde, kommuniziert aktiv mit einer RESTful API und kann somit die Chargenprotokolldaten direkt an die WebApplikation übergeben. Da die Materiallogistik per Smartphone App getrackt werden soll, wurde ein öffentlicher Container realisiert, welcher nur entsprechende Anfragen an die WebApplikation weiterleitet. Aus Übersichtilichkeitsgründen ist dieser nicht in Abbildung 7-30 dargestellt. Die Fertigertelematik kommuniziert mit einer SOAP API. Da die WebApplikation den SOAP Standard nicht realisiert wird dies anhand einer eigenständigen Applikation in einem separaten Container realisiert. Dazu kommt noch eine aktive Schnittstelle, welche zyklisch die Daten der Nachbearbeitungsmaschinen von dem Telematikdienst abfragt. Zusammenfassend läuft die Erfassung der Daten wie folgt ab:

Mischanlage:	Datenlogger → Mischanlagen API → Datenbank
Materiallogistik:	$App \rightarrow Logistik \ \texttt{öffentliche Schnittstelle} \rightarrow lokale Schnittstelle \rightarrow Datenbank$
Fertiger:	Datenlogger $ ightarrow$ Wirtgen Telematik $ ightarrow$ Fertiger API $ ightarrow$ Datenbank
Nachbearbeitung:	Telematikdienst $ ightarrow$ Telematikschnittstelle $ ightarrow$ Datenbank
Manuell:	Webformular -> Datenbank

Die erhöhte Komplexität bei der Erfassung der Datenpakete kommt aus der Ankopplung an das Telematiksystem, welches weitere Vorteile, wie eine sichergestellte Übertragung der Daten auch wenn es durch Abdeckungsproblemen zu Verbindungsabbrüchen kommen sollte, mit sich bringt.

7.3.3.2 Mischerseitige Entwicklung der Intelligenten Vernetzung und Kommunikation

Im Kontext der Messkampagnen und der damit verbundenen Analysen zur Produktqualität muss auch die Integration der Messtechnik und Datenübertragung in den baupraktischen Betrieb von Mischanlagen erfolgen. Hierbei gilt es im Gesamtsystem "Mischanlage" entsprechende Schnittstellen im Ablauf des Datenmanagements zu identifizieren. Dazu wurde der Ablauf der Signalverarbeitung anhand bestehender Anwendungen von der Fa. Liebherr Mischtechnik und dem ISYS untersucht. In Abbildung 7-31 ist schematisch der resultierende konzeptioneller Ablauf des gesamten Datenmanagements einer Mischanlage allgemein dargestellt. Die ersten beiden Spalten repräsentieren die Infrastruktur zur Datenerhebung und Kommunikation vor Ort. Die Punktewolke in der Mitte ist ein zentrales cloudbasiertes Datenmanagementsystem "Liebherr Cloud" einer Liebherr Mischanlage und bietet bereits Schnittstellen auf Teile der Daten. Die zwei Spalten auf der linken Seite sind die Anwendungsbereiche. Dabei wird von links nach rechts der Abstraktionsgrad erhöht bzw. die Anwendungen stellen von rechts nach links gelesen Zugriffe auf die einzelnen Teilsysteme dar.



Abbildung 7-31: Konzeptioneller Ablauf des Datenmanagements.

Anhand dieser Struktur gliedert sich das zentrale Leitsystem des Forschungsvorhabens als weitere Echtzeit-Anwendung. Im Sinne der Wiederverwendbarkeit sollen hier die bestehenden Schnittstellen für Echtzeit-Anwendungen weiter untersucht und für den Einsatz im zentralen Leitstand vorbereitet werden. Hierbei ist von besonderem Interesse, dass an alle für die Prozessüberwachung relevanten Daten auch gelangt werden kann und welche der bestehenden Schnittstellen sich für den Einsatz im zentralen Prozessleitsystem sich mit geringem Aufwand adaptieren.

Um die Einbindung der Mischanlage in das zentrale Leitsystem und Datenerfassungssystem zu vereinfachen, wurde eine neue Anwendung durch die Fa. Liebherr entwickelt, welche Daten aus der Datenbank der Mischanlagensteuerung an eine RESTful Schnittstelle der WebApplikation im JSON Format überträgt. Ein Screenshot der entwickelten Anwendung ist in Abbildung 7-32 dargestellt. Die Serverseite wurde durch das ISYS konzipiert und realisiert. Hierbei wurde auf die, durch das ISYS bereitgestellte, Infrastruktur (VPN) zurückgegriffen und über ein zyklisches Auslesen der Daten der Anlagensteuerung die Übertragung abgeschlossener Batches an die API getriggert werden.

■ B	40DataBasePusher					_		×
Id	Production Date	Start Time	Disc End	Time N	Mix Desigr	n Quant	ity	
				r				
	Start Dat	um: 01.12.2	2020	1	s Refresh	Batches	C	ylic
					-	Rece	ived Bato	:hes:0/0

Abbildung 7-32: Benutzerinterface der Datenschnittstelle auf der Mischanlagensteuerung.

Die Daten in den digitalen Lieferscheinen ist hierarchisch aufgebaut. Die Struktur der Daten ist in Abbildung 7-33 schematisch dargestellt. Alle Kenngrößen einer Charge werden dem *batch* direkt zugeordnet und die Kenngrößen der einzelnen Waagevorgänge werden jeder Charge über die Liste *batch_detail* separate zugeordnet. Damit besteht eine Charge aus Kennungen wie der *plant_id* und *plant_batch_id*, aus Vorgabewerten wie der *production_quantity, specified_mixing_time,* usw. und Mess- bzw. rechnerischen Werten wie *actual_concrete_temperature, wc, actual_consistency,* usw. Weiter sind eine beliebige Anzahl an Waagedetail *batch_detail* einem *batch* zugeordnet. Dieses *batch_detail* enthält die Einzelheiten zu jedem Waagevorgang wie der Einwaage *actual_value,* dem Vorgabewert *set_value* und Korrekturwert *correction_value*. Weiter werden hier auch wenn vorhanden die Materialfeuchten *moisture* und ob diese automatisch oder manuell bestimmt wurden (*moisture_manual_mode*) dem Waagevorgang zugeordnet. Auf diese Weise ist die Anzahl der Waagevorgänge in jeder Charge nicht beschränkt und somit auch nicht die Materialien im Rezept des Betons.



Abbildung 7-33: Struktur der Datenpakete der Mischanlagen API.

Die in 2019 entwickelte Anbindung zum automatisierten Datenabgleich wurde im Rahmen Baustelle Cleversulzbach an der Schnorpfeil Anlage in Betrieb genommen und getestet. Die Ergebnisse der simultanen Übertragung der batchbezogenen Messdaten an das zentrale Datenerfassungssystem des BF4.0 Projektes erlaubt die gesamtheitliche Integration der Überwachung des Mischprozesses. Basierend auf den Daten konnten die Projektpartner Auswertungen über den Gesamtprozess von der Herstellung des Betons in der Anlage, über den Transport, die Fertigung der Fahrbahn, sowie die Nachbearbeitung auf Basis einzelner Chargen durchführen.

Die Schnittstelle wurde im Nachgang überarbeitet und an der Baustelle A1 Wittlich-Hasborn gesamtheitlich getestet.

7.3.3.3 Erfassung der Materiallogistik in der WebApplikation

Die Materiallogistik zwischen Mischanlage und Fertiger ist ein wesentlicher Bestandteil für den Ablauf der Baustelle. Daher ist es wichtig in Echtzeit die Information über die Position der Fahrzeuge zu wissen. Weiter können auf diesen Daten weitere Analysen und Aufbereitung wie sie beispielsweise in Abschnitt 7.2.4.1 vorgestellt wurden durchgeführt werden. Damit diese Informationen in Echtzeit erhoben werden, können Smartphone Apps eingesetzt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei Apps getestet. Einerseits wurde die App *gpslogger* von *mendhak* [mendhak 2021] getestet. Diese App ist eine leichtgewichtige und sehr flexible GPS Logging App. Leider ist diese App nur für Android verfügbar und der Entwickler stellte die aktive Weiterentwicklung während der Laufzeit des Projektes ein. Somit ist diese auch aus dem PlayStore verschwunden. Das schließt einen effektiven Einsatz auf der Baustelle aus. Die zweite App, welche als Alternative getestet wurde, ist der *Traccar Client* von Traccar Ltd [Tracar 2021]. Diese App ist ebenfalls eine sehr leichtgewichtige GPS Logging App. Sie bietet nur

das Aufzeichnen gegen eine Webschnittstelle nach einem fest vorgeschriebenen Format. Daher ist die Konfiguration sehr einfach und die Serverseite wurde durch die am ISYS entwickelte WebApplikation integriert.



Abbildung 7-34: Struktur der Datenpakete der Smartphone App Überwachung der Materiallogistik.

Die Daten, welche von der Traccar Client App übertragen werden, werden der *vehicle_position* zugeordnet. Die unterschiedlichen Fahrzeuge werden über die *device_id* unterschieden und gesammelt in einer Datentabelle abgelegt. Die Struktur wird in Abbildung 7-34 schematisch dargestellt.

Neues Fahrzeug		
Fahrzeugkennung	aktiv	Bemerkung
UB2	~	
OB14	~	
UB6	~	
UB9	~	
UB7	~	
OB4	~	
UB3	~	
UB8	~	
UB4	~	
UB10	~	
UB11		
	Fahrzeugkennung Fahrzeugkennung UB2 OB14 UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB3 UB3 UB3 UB4 UB3 UB4 UB5 UB4 UB5 UB4 UB5 UB4 UB5 UB4 UB5 UB4 UB4 UB4 UB4 UB40 UB40 UB40	Pahrzeugkennug aktiv UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB2 UB3 UB7 UB8 UB8

Abbildung 7-35: Ausschnitt des Konfigurationsinterfaces der Schnittstelle.

Da eine einfache Einrichtung auf fremden Smartphones vorausgesetzt ist, ist die Schnittstelle öffentlich aus dem Internet erreichbar. Damit ist es wichtig, dass während des Betriebs auf der Baustelle Kontrolle über die Erfassung der GPS Daten für die Materiallogistik auf der Betreiberseite besteht. Somit wurde eine Administrationsseite eingerichtet, bei der die bekannten Fahrzeugkennungen angelegt werden müssen und die Fahrzeuge bei Bedarf abgeschaltet werden können. Ein Ausschnitt dieses Konfigurationsinterfaces ist in Abbildung 7-35 gezeigt.

7.3.3.4 Entwicklung der Schnittstelle zum Gleitschalungsfertiger

7.3.3.4.1 Fertigerseitige Entwicklung der Intelligenten Vernetzung und Kommunikation

Im Rahmen der Prozessüberwachung wird von der Firma Wirtgen eine Anwendung für die digitale Vernetzung entwickelt. Die Anwendung dient dazu Rohdaten einzusammeln, auszuwerten und im Anschluss zum einen auf einem Display anzuzeigen, zum andern an den digitalen Leitstand zu senden. Abbildung 7-36 zeigt schematisch den Ablauf dieser Applikation.



Abbildung 7-36: Ablaufdiagramm der Telematikapplikation.

Die Anwendung selbst stellt zunächst verschiedene Schnittstellen zu der erweiterten Messtechnik des Fertigers her. Hierzu zählt die Kommunikation zum CAN-Bus der Maschine, von dem aktuelle Maschinendaten entgegengenommen werden. Vom Laserscanner werden die gemessenen Abstandswerte bereitgestellt, die für die Ebenheitsauswertung die Grundlage bilden. Ein GPS-Empfänger gibt Auskunft über die globale Einbauposition. Mit Hilfe einer Wetterstation mit Temperaturkamera kann Aussage über Umwelteinflüsse getroffen werden.



Abbildung 7-37 Stationierung der GPS-Position

In der Folge werden die entgegengenommenen Rohdaten in einer Gliederungslogik vorverarbeitet. Die Gliederungslogik unterscheidet in einem ersten Schritt, ob die Maschine im aktuellen Intervall arbeitet (Betoneinbau) oder lediglich eine Transportfahrt durchführt – lediglich Einbauintervalle werden weiterverarbeitet. Weiter gibt es in der Gliederungslogik eine Triggerung der Auswertung nach Zeit (5 Sekunden) und nach Weg (10 Zentimeter).

Nach der Gliederung wertet die Auswertung die Rohdaten aus. Hierbei wird jedes Profil nacheinander ausgewertet und stationiert, um die Datenmengen stark zu reduzieren. Die Stationierung bildet Bereiche ab, in denen die Werte linear interpoliert werden können. Ein Beispiel einer Stationierung zeigt die folgende

Abbildung 7-37 für globale Positionen. Während die Rohkoordinaten (schwarz) aus etwa 3000 Einzelpunkten bestehen, bildet die Stationierung die gleiche Trajektorie mit ca. 20 Punkten ab.

Aus diesen stationierten Daten werden alle 5 Minuten bzw. 10 Metern Fahrweg Datenpakete generiert, die abschließend per Telematik an den digitalen Leitstand versendet werden.

7.3.3.4.2 Serverseitige Implementierung der Fertiger API

Zur serverseitigen Implementierung der Fertiger API wurde für die Applikationsplattform eine webbasierte Schnittstelle (API) am ISYS in Kooperation mit Wirtgen entwickelt. Im Folgenden werden die hierzu notwendigen auszutauschenden Daten definiert, der Workflow von Empfangen der Telematik Nachricht bis hin zur Ablage in die Datenbank beschrieben und das Konzept der Implementierung vorgestellt.



Abbildung 7-38: Struktur der Datenpakete aus der Fertiger Telematik API.

Damit eine einheitliche Schnittstelle aufgebaut werden kann müssen neben der Art und Weise der Übertragung auch die Nutzdaten definiert werden. Hierbei haben die Fa. Wirtgen und das ISYS für den Test auf der Technikumsmaschine in Aachen auf ein hierarchisches XML Schema definiert indem die Fahrbahn in einzelne Stationen zerlegt wird. Eine Station beinhaltet immer alle Messwerte zum aktuellen Zeitpunkt (Zeitstempel, Position, Dicke, Ebenheit, ...) und kann über verschiedene Trigger erzeugt werden. Die Trigger zum Erzeugen einer Station können sowohl Zeit- als auch Positionsintervalle aber auch Ereignisse wie das Einrütteln der Anker und Dübel sein. Damit nicht ständig Daten übertragen werden müssen werden über einem Zeitintervall auf den Fertiger Stationen in einer Stationsliste gesammelt und nach einem Zeitintervall oder bei Abschalten des Fertigers (packageTrigger) übertragen. Die Übertragung der Stationsliste findet zusammen mit weiteren Metadaten wie einem Index, einer Maschinen ID und den Trigger-Informationen statt. Um eine verwertbare Übertragung sicherzustellen und diese Daten in der zentralen Datenbank ablegen zu können, werden alle Datenpakete (dataPackage) anhand des in Abbildung 7-29 gezeigten Schemas auf Struktur und Vollständigkeit geprüft. Die Abbildung wird von links nach rechts gelesen. D.h. ein *dataPackage* besteht aus einem *packagelndex*, einer *machineID*, einem *packageTrigger* und einer *stationlist*. Die *stationlist* besteht aus 0 – beliebig vielen *stations*, was durch den Zusatz (0...∞) gekennzeichnet wird. Alle anderen Felder müssen genau aus einem Objekt bestehen. Diese Struktur ist im Rahmen der Entwicklungen noch flexibel adaptierbar auf weitere Daten.

Die Implementierung der Fertiger API basiert auf einer Beispielimplementierung der Wirtgen Telematik Schnittstelle im Java Spring Framework. Die Beispielimplementierung wurde von der Fa. Wirtgen dem ISYS zur Verfügung gestellt. In dieser wurde die SOAP API grundlegend definiert und die Gültigkeit der Nutzdaten anhand der CRC Prüfsummenberechnung geprüft. Auf dieser Basis wurde die Schnittstellendefinition angepasst, damit diese über das Netzwerk unter den richtigen Endpunktinformationen erreichbar ist. Die zwei zusätzlichen Aufgaben wurden als analog zu der Beispielstruktur durch eigenständige Services realisiert und in die Implementierung integriert. In Abbildung 7.39 ist der strukturelle Aufbau der Schnittstelle beschrieben. Dabei implementiert der *Request Handler* die Funktion des Zugriffs auf die API. Dieser nacheinander dann die Dienste *CRC Validation, XML Unmarshaller* und *SQL Database* um die Nutzdaten analog zu dem beschriebenen Vorgehen zu verarbeiten und abzulegen. Der Dienst des *XML Unmarshallers* ist dabei die Prüfung und Übersetzung des XML Strings in ein Java-Objekt, welches durch die Software weiterverarbeitet werden kann.



Abbildung 7-39: Struktur der Fertiger API.

7.3.3.5 Telematik Schnittstelle für Nachbearbeitungsmaschinen

Bei der Nachbearbeitung spielt der zeitliche Ablauf der Arbeitsschritte auf der Baustelle eine wesentliche Rolle. Dabei sind neben der Fertigerposition auch georeferenzierte Zeitstempel der mobilen Arbeitsmaschinen eine wichtige Information. Zusätzlich kann, bei entsprechender Aufbereitung die Maschinenposition, die manuelle Baustellendokumentation entlastet werden, da nur noch Messungen und Unregelmäßigkeiten erfasst werden müssten.

Der Fuhrpark der Nachbearbeitungsmaschinen im Projekt ist zum Großteil mit einem Telematik System ausgestattet. Zusätzlich wurde ein mobiler Tracker beschafft, um die Sprühbühne im Projekt flexibel auszustatten. Beispielhaft sind zwei Tracker in Abbildung 7-40 gezeigt. Auf der linken Seite ist der mobile Tracker dargestellt und rechts ein Bild eines Trackers, welcher auf einer Bürste verbaut ist.

Da Bürsten im Wesentlichen ein Radlader mit einem Kehrmaschinenaufsatz sind, werde diese gerne flexibel auch für andere Aufgaben eingesetzt. Damit eine eindeutige Klassifizierung des Arbeitseinsatzes Bürsten in den Telematik Daten möglich ist, wurde zu jeder Positionsmeldung zusätzlich noch eine Kennung über den Bürstenzustand mitgeliefert. Technisch wurde das über das Steuersignal des Hydraulikwerkzeugs gelöst, welches auf einen Digitaleingang des Telematik Trackers gelegt wurde. Die anderen Arbeitsmaschinen werden auf der Baustelle ausschließlich zur Bearbeitung eingesetzt und eine zusätzliche Kennung des Zustands ist nicht notwendig.



Abbildung 7-40: Telematik Tracker der Nachbearbeitungsmaschinen.

Da der von OAT genutzte Telematik Dienstleister die Möglichkeit bietet die per Schnittstelle die auf die Positionsmeldungen zu zugreifen. Hierzu müssen aktiv HTTP Anfragen an den entsprechenden Endpunkt mit Parametern gesendet werden. In den Parametern muss im vorliegenden Fall ein *Firmenschlüssel, Fahrzeugschlüssel* und *Zeitraum* enthalten sein. Die Schnittstelle antwortet mit den angefragten Daten im csv Format. In Abbildung 7-41 links ist die Struktur der Daten dargestellt. Da dies eine vollwertige Telematik Schnittstelle ist, sind enthält diese mehr Informationen als in diesem Kontext benötigt werden. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die reduzierte und umbenannte Datenstruktur der WebApplikation dargestellt. Die Linien zeigen die Verbindung der einzelnen Felder. Die digitalen Eingänge werden bei der Bürste zur Identifikation des Arbeitszustands genutzt. Da hier mehrere Eingänge zur Verfügung stehen, wird hier durch die WebApplikation eine Auswertung durchgeführt.



Abbildung 7-41: Struktur der Datenpakete der Telematik Schnittstelle (links) und Nutzdaten der WebApplikation (rechts) der Nachbearbeitungsmaschinen.

Da es sich bei dieser Schnittstelle um eine passive Schnittstelle des Telematik Dienstleisters handelt, muss die WebApplikation regelmäßig die Daten abholen. Da die WebApplikation aktuell rein passiv aufgebaut ist, muss diese erweiterte werden. Hierzu wurde ein weiterer Dienst auf dem WebServer entwickelt, welcher zyklisch einen Endpunkt der WebApplikation triggert. Über den Endpunkt der WebApplikation werden entsprechende Anfragen an die Telematik Schnittstelle generiert und verarbeitet. Auf diese Weise ist die Kommunikation mit der Schnittstelle in der WebApplikation gekapselt und kann hier auch manuell genutzt werden. Damit nicht immer Daten von allen bekannten Maschinen abgefragt werden müssen und eine bessere Zuordnung zu einer Baustelle möglich ist, wurde ein Buchungssystem zur Konfiguration der Telematik Schnittstelle entwickelt. Es werden zunächst die Telematik Schlüssel zu den Maschinen erfasst. Ein Schlüssel enthält Informationen über einen eigenen Namen, den API-Schlüssel&Typ, den Typ der Maschine und einen Bemerkungstext. Dann werden Buchungen für die zyklische Abfrage der Daten angelegt. Hierbei werden die Baustelle, der Firmen- und Fahrzeugschlüssel, sowie der Zeitraum angelegt. Die Übersichtstabellen des Buchungssystem ist in Abbildung 7-42 und Abbildung 7-43 gezeigt.

Telematik Schlüssel

Neuer Schlüssel

	• Head beindsser					
	Name	Тур	Schlüssel	Maschinentyp	Eingangnr	Bemerkung
Ľ	OAT Firmenschlüssel	Firmenschlüssel	6C14****			
Ľ	Weidemann Radlader	Fahrzeugschlüssel	E826****	Bürste	3	
Ľ	UniCut 520 1733 Oberpframmern	Fahrzeugschlüssel	D2AB****	Fugenschneider (quer)		
Ø	UniCut 1073 Bietigheim	Fahrzeugschlüssel	F5AD****	Fugenschneider (quer)		
Ľ	FS 41/4 1143 Bietigheim	Fahrzeugschlüssel	70D5****	Fugenschneider (längs)		
Ľ	mobiler Tracker	Fahrzeugschlüssel	5A0A****	Sprühbühne		Für Bühne und Referenz
Ľ	UNI 520/Quer 1702	Fahrzeugschlüssel	CF1A****	Fugenschneider (quer)		
Ľ	FS 500 1554	Fahrzeugschlüssel	40DC****	Fugenschneider (längs)		
Ľ	FS 500 1635	Fahrzeugschlüssel	68BD****	Fugenschneider (längs)		

Abbildung 7-42: Telematik Schlüssel Erfassung in der WebApplikation.

Telematik Buchungen

	Neue Buchung			
	Baustelle	Firma	Fahrzeug	Zeitraum
22 00	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	mobiler Tracker	9. Dezember 2020 - 9. Dezember 2020
◪◪መ	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	FS 41/4 1143 Bietigheim	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
C C (1)	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	Weidemann Radlader	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
22 00	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	UniCut 1073 Bietigheim	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
22 00	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	UNI 520/Quer 1702	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
◪◪መ	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	FS 500 1554	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
22 00	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	FS 500 1635	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
22 00	A1 Wittlich - Hasborn (2656)	OAT Firmenschlüssel	mobiler Tracker	4. November 2020 - 4. Dezember 2020
22 00	Testbaustelle	OAT Firmenschlüssel	mobiler Tracker	28. Oktober 2020 - 3. November 2020
◪◪መ	A5 St. Leon-Rot	OAT Firmenschlüssel	UniCut 520 1733 Oberpframmern	20. Oktober 2020 - 31. Oktober 2020
22 00	A5 St. Leon-Rot	OAT Firmenschlüssel	Weidemann Radlader	20. Oktober 2020 - 31. Oktober 2020
◪◪መ	Testbaustelle	OAT Firmenschlüssel	Weidemann Radlader	12. Oktober 2020 - 19. Oktober 2020
C C (1)	A81 Cleversulzbach (2640)	OAT Firmenschlüssel	Weidemann Radlader	17. August 2020 - 21. August 2020
◪◪መ	A81 Cleversulzbach (2640)	OAT Firmenschlüssel	UniCut 520 1733 Oberpframmern	17. August 2020 - 31. August 2020
22 00	A81 Cleversulzbach (2640)	OAT Firmenschlüssel	FS 41/4 1143 Bietigheim	17. August 2020 - 31. August 2020
◪₽∞	A81 Cleversulzbach (2640)	OAT Firmenschlüssel	UniCut 1073 Bietigheim	17. August 2020 - 31. August 2020

Abbildung 7-43: Telematik Buchungen anlegen.

7.3.3.6 Webschnittstelle zur manuellen Datenerfassung

Auf Basis der Erkenntnisse des der Baustellenanalysen aus AP A in Kapitel 5.1 und im speziellen um zielgerichtet die Ermittlung qualitätsrelevanter Daten voranzutreiben wurde eine Webschnittstelle zur Erfassung manuell zu bestimmender Parameter implementiert. Hierfür wurden auf der Applikationsplattform mittels eines Webentwicklungsframeworks eine Toolchain zur Entwicklung einer Applikation zum manuellen Erfassen von Messprotokollen und Baustellenpersonaleinschätzungen für den Webserver Container am ISYS entwickelt. Ein wichtiger Fortschritt, welcher damit im Projekt erreicht werden konnte ist, dass die Daten nun digital in einer gemeinsamen Datenbank abgelegt werden und über die bereits erfassten Protokolle schon in einem eingeschränkten Umfang "Echtzeit"-Informationen auf der Baustelle unter dem Baustellenpersonal ausgetauscht werden können. Weiter können diese erfassten Daten einfach weiterverarbeitet werden und müssen nicht mehr aufwendig aus den händischen Messprotokollen digitalisiert werden.



Abbildung 7-44: Beispielanzeige der Webschnittstelle zur manuellen Dateneingabe auf einem Tablet.

Die Erfassung der Daten erfolgt auf der Baustelle mittels eines Handys oder eines Tablets, welches sich per App mit einem VPN Account im Baustellen VPN einwählt. Mit dem Gerät wird mittels eines Webbrowsers auf die Applikationsseite zugegriffen und anhand der Navigation sich die zugehörige Rubrik rausgesucht. In Abbildung 7-44 ist beispielsweise links die Übersichtstabelle der erfassten Frischbetonuntersuchungen sowie die ausgeklappte Navigation und rechts das Eingabeformular für die Erfassung der Schnittprotokolle auf der Referenzbaustelle Wittlich II dargestellt.

In den folgenden Abschnitten werden kurz die Inhalte der implementierten Formulare der Nachbarbeitungsschritte und der Baustellenüberwachung diskutiert.

7.3.3.6.1 Nachbearbeitung

Die Erfassung der Daten aus der Nachbearbeitung erfolgt zum aktuellen Stand manuell. Hierbei wurde bei der Implementierung der entsprechenden Formulare auf den gewonnenen Erkenntnissen der vorangegangenen Analysen aufgebaut, um die entstandenen Probleme zu vermeiden. Weiter wurde ein spezielles Augenmerk auf die gute Integration in die Arbeitsprozesse des Baustellenpersonals gelegt.

Sprühen	Bürsten	Schneiden
Baustelle	Baustelle	Baustelle
Zeitstempel	Zeitstempel	Zeitstempel
Station	Station	Station
Witterung	Witterung	Fugenart

Tabelle 7.6: Definition eines Datensatzes für die Nachbearbeitung

Lufttemperatur	Lufttemperatur	Witterung
GPS Position	Luftfeuchtigkeit	Lufttemperatur
Bemerkung	9 Festigkeiten	Luftfeuchtigkeit
	4 Texturtiefen	9 Festigkeiten
	GPS Position	GPS Position
	Bemerkung	Bemerkung

Zur möglichst breiten Erfassung der relevanten Daten wurden drei Eingabeformulare realisiert und gemäß der bearbeitenden Teams getrennt. D.h. es wurden die Schritte *Sprühen, Bürsten* und *Schneiden* unterschieden. Die relevanten Daten wurden anhand der Untersuchung der qualitätsrelevanter Daten in Abschnitt 5.1.8.2 bestimmt und in enger Zusammenarbeit zwischen dem ISYS und OAT ergänzt. Tabelle 7.6 fasst die definierten Daten zusammen. Die Baustelle, der Zeitstempel, die Station und die Fugenart bilden die *funktionellen Daten* und die Witterung, die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Betontemperatur, die neun Festigkeitswerte und die vier Texturtiefen die *Daten zur Qualitätsanalyse* pro Datensatz (Messreihe). Weiter werden diese Daten um die GPS Position des Eingabegeräts und einen Bemerkungstext ergänzt. In Abbildung 7-45 ist dabei das Vorgehen zur Übertragung der in der Mindmap aus dem Workshop als wichtig gekennzeichneten Parameter für den Prozessschritt des Schneidens angedeutet. Rechts der Abbildung ist die realisierte Eingabemaske zur Erfassung der Schnittprotokolldaten dargestellt.



Abbildung 7-45: Übertragung der Ergebnisse aus Workshop für Wittlich II

Bei der Erstellung der Formulare wurde auch der Arbeitsschritt des Ausfüllens betrachtet. Es wurden zur Verbesserung der Datenqualität die funktionellen Daten als Pflichtfelder hinterlegt um eine spätere Verwertung der Daten zu gewährleisten. Zur Verbesserung der Eingabegeschwindigkeiten wurden, sofern dies sinnig ist, Standardwerte eingetragen. Beispielsweise ändert sich die Baustelle eigentlich nicht und ist daher immer mit dem letzten erfassten Wert vorbelegt. Die realisierten Eingabeformulare für die Sprüh- und Bürstprotokolle sind in Abbildung 7-46 gegeben.

Eingabemaske Spi	rühprotokolle	Eingabemaske Bü	rstprotokolle	
Erfassung der Basisdaten		Erfassung der Basisdaten		
Baustelle:	A1 Wittlich-Saimtal II	Baustelle:	A1 Wittlich-Salmtal II	
Zeitstempel:	16.10.2019 10:02:31	Zeitstempel:	23.10.2019 04:19:31	
Station	113+140	Station:	114+750	
Witterung:	bew0ikt V	Witterung:	klar	T
Lufttemperatur:	12,0	Lufttemperatur:	9,0	
Position	Position setzen 4t 6,	Betontemperatur:		
Bemerkung:		Luftfeuchtigkeit:	92,0	
		Messverfahren Festigkeit:		
		Fostigkeit		
22. PM	11			
Karte	+			
	The state of the s	Messverfahren Texturbele:	Sandfleck	
		Texturtiefe:	0,9	
	1 1			
	100000000000000000000000000000000000000	Position:	Position setzen	4 6
	Lafte O Openitorship	Bernerkung:		
Abschicken Abbrechen	Löschen			
		Karte:	=	
			[A1] 1	8
			n 14	Leaflet O OpenStreetM
		Abschicken Abbrechen	Löschen	

Abbildung 7-46: Eingabeformulare der Sprüh- und Bürstprotokolle.

Damit der Benutzer auch den Fortschritt der Baustelle nachvollziehen kann und ggf. bei fehlerhaften Eingaben auch Korrekturen vornehmen kann wurden Übersichtstabellen realisiert. Exemplarisch ist in Abbildung 7-47 ein Ausschnitt der erfassten Sprühprotokolle gegeben. Es ist in dieser Übersicht auch gut zu erkennen, dass die Bemerkungsfelder durch OAT rege genutzt wurden und dass zu Beginn der Baustellenerprobung noch die Zeitzone nicht gestimmt hatte. Auch bei der Erfassung der GPS Positionen der Tablets gibt es noch einige Schwierigkeiten. Die Ursache, warum dies auf der Baustelle nicht gut funktionierte, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch unklar.

orü	ihprotokolle					
Erfa	asste Eingaben					
Ne	euen Datensatz erfas	sen				
	Baustelle	Zeitstempel	Station	Witterung	Lufttemperatur	Bemerkung
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 10:45	Platte 035 109+330	bewoelkt	13,0	Betontebeginn 8.30 Sprühbeginn 9.00 Positionsangabe falsch
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 12:33	109 435	bewoelkt	16,0	
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 12:36	109+435	bewoelkt	16,0	11.38 Uhr
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 12:58	109+455	bewoelkt	16,0	Uhr: 12.00
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 14:01	109+500	bewoelkt	18,0	13.00 uhr
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 15:00	109+535	bewoelkt	17,0	14.00 Uhr Sehr schlechte Internet Verbindung auf der Baustelle.
1	A1 Wittlich-Salmtal	24.09.2019 17:53	109+600	regnerisch	14,0	Abbruch wegen Regen 1. Lage 1h vorher raus 2 Lage 20 min vorher raus
1	A1 Wittlich-Salmtal	25.09.2019 11:12	109+660	bewoelkt	15,0	Tablet im Hotel Eintragung sporadisch TAT 10.00 Sprühbeginn gelegentlich nieseln Standzeit10 min da kein Beton
1	A1 Wittlich-Salmtal	25.09.2019 11:32	109+680	bewoelkt	16,0	Erneuter Stillstand wegen fehlendern Beton
1	A1 Wittlich-Salmtal	25.09.2019 11:48	109+680	bewoelkt	16,0	Fortsetzung der Betonage nach 20 Minuten Standzeit keine Abstände zwischen Fertigern und Sprühbühne
1	A1 Wittlich-Salmtal	14.10.2019	112 + 350	klar	14,0	Betoneinbau beginn bei 112 + 300 Ansatz (Nachgearbeitet = N G)

Abbildung 7-47: Tabelle über bereits erfasste Sprühprotokolle.

7.3.3.6.2 Baustellenüberwachung

Analog zu den Nachbearbeitungsschritten wurden für die Baustellenüberwachung durch das ISYS zwei Webformulare erstellt. Mittels diesen sollen einerseits die Messwerte aus der Eigenüberwachung digitalisiert und andererseits die Erfahrungswerte des Baustellenpersonals erfasst werden. In Abbildung 7-48 sind die erstellten Formulare dargestellt. Das Linke ist auf Basis der Messprotokolle von Schnorpfeil erstellt worden und gibt dem Nutzer die Möglichkeit alle seitens Schnorpfeil definierten Größen einzutragen. Rechts in der Abbildung ist das Formular zur Abfrage der Erfahrungswerte zu sehen. In beiden Formularen werden als *funktionelle Daten* der Zeitstempel und die Lieferscheinnummer aus der Mischanlage (Chargen ID) erfasst. Somit wird sichergestellt, dass die erhobenen Daten für die weiteren Analyseschritte mit den weiteren Baustellenmessungen sinnvoll verglichen werden können. Bei dem Eingabeformular zur Frischbetonbewertung sollen durch eine einfache und schnelle Eingabe die Einschätzung des Personales erfasst werden. Dies ist über mit Schnorpfeil zusammen vordefinierte Auswahlmöglichkeiten realisiert worden. Damit erfolgt die Bewertung des Betons in fünf Kategorien. Die mittlere Kategorie ist ein guter Beton und es gibt jeweils zwei Abstufungen in die Richtungen "zu nass" und "zu trocken". Die weiteren Felder stellen die erfassten Einschätzungen in den richtigen Kontext.

Neben den Eingabemasken wurden auch analog zu der Nachbearbeitung Übersichtstabellen aufbereitet.

Eingabomasko Erischhotonuntorsuchung

assung der Basisdaten			Erfassung der Basisdaten		
Baustelle:	A1 Wittlich-Saimtal II		Zeitstempel:	17.10.2019 10:34:00	
Bauabschnitt:			Lieferschein:	5939 Anlage 1	
Betonsortennummer:	612121 (Oberbeton)	Ψ.	Fahrzoug:	11	
Lieferwerk:	Schnorpfell		Ort	keine Auswahl	
Zeitstempel:	17.10.2019 11:39:00			Mischanlage Fertiger	
Probenummer:	80,0		Betonart:	🔘 koine Auswahl	
Lieferschein:	5947 Anlage 1			Unterbaton Oberbeton	
Lufttemperatur:	14,0		Bourtoilung:	© keine Auswahl	
Betontemperatur:	22,0			 zu trocken etwas zu trocken 	
Konsistenz:	345			 ок 	
VersuchKonsistenz:	Ausbreit	•		 etwas zu nass zu nass 	
LPGohalt:	5,2		Bemerkung:		
Rohdichte:	2,43				
Pruefer:	Prüfer 1	v			
Bemerkung:					
			Abschicken Abbrechen	Löschen	
		11			

Abbildung 7-48: Formulare zur Erfassung der Messwerte Frischbetonüberwachung (links) und der Einschätzung der Betonkonsistenz (rechts).

7.3.3.7 Erste Tests und Erkenntnisse auf der Baustelle Wittlich II

Anhand der Daten, welche in den Onlineformularen in Wittlich II erfasst wurden, können erste exemplarische Untersuchungen durchgeführt werden. Gerade im Hinblick auf den Schnittzeitpunkt ist es dabei interessant zu betrachten, ob eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung steht um eine eventuelle Korrelation zwischen Wetterdaten und der Dauer des Aushärteprozesses herzustellen. Dazu sind in Abbildung 6.36 zunächst die bei jeder Formulareingabe erfassten Temperaturen mit denen einer nahen Wetterstation verglichen. Dabei sind in a) die Lufttemperaturen und in b) die Betontemperaturen beim Schneiden und die von der Wetterstation allgemein ermittelte Bodentemperatur dargestellt. Die Lufttemperatur korreliert dabei gut und die Betontemperatur liegt wie zu erwarten leicht über der Bodentemperatur. Anhand der Temperaturdaten, der Sonnenscheindauer und der Niederschlagsmenge in c) kann dann eine Klassifikation der Wetterlage durchgeführt werden. Diese ist z.B. in d) dargestellt. Es wird dabei zwischen den Klassen "sonnig", "bewölkt", "feucht" und "regnerisch" anhand der Daten der letzten 5 h vor Auswertung unterschieden.

Eingabemaske Frischbewertung


Abbildung 7-49: Übersicht über vorhandene Wetterdaten und die Ableitung von allgemeinen Wetterzuständen "regnerisch, feucht, bewölkt, sonnig"

Demgegenüber sind in Abbildung 7-49 die Zeitdauern dargestellt, die zwischen den einzelnen Nachbearbeitungsschritten Sprühen, Bürsten und Schneiden vergangen sind. Für diese Darstellung müssen jedoch die Kilometermarken, welche im Zuge der Onlineformulare erfasst wurden, sowohl in den Sprüh- als auch Bürstund Schneiddaten auftauchen. Ansonsten ist keine Zuordnung der Einbauposition möglich. Da die Eintragung in die Onlineformulare in Wittlich II nur getestet und iterativ angepasst wurde, ist diese Übereinstimmung nur für ein paar Datensätze gegeben. Dadurch sind nur bedingt Aussagen über die statistische Verteilung möglich. Für die Nachbearbeitung vor allem interessant ist z.B. die Differenz zwischen Sprüh- und Schnittzeitpunkt in der mittleren Darstellung. Dabei zeigt sich, dass zwischen 11 h und 20 h zwischen Sprühen und Schneiden vergehen, wobei eine Häufung bei ca. 14 h auftritt. Aufgrund der geringen Datenmenge (22 Datensätze) sind statistische Aussagen jedoch mit Vorsicht zu genießen.

Dennoch kann anhand dieser Daten in Abbildung 7-50 ein Vergleich mit den Wetterbedingungen aufgestellt werden. Dabei sind die Wetterdaten jeweils so gruppiert, dass diese der oben dargestellten Differenzzeit zwischen Sprühen und Schneiden entsprechen. Anhand von Erfahrungen auf der Baustelle ist dabei zu erwarten, dass je kälter die Umgebungstemperatur ist, umso langsamer läuft der Aushärtevorgang von Statten und desto länger ist die Differenzzeit. Zudem zeigen Beobachtungen, dass der Schnittzeitpunkt bei kalt feuchtem Wetter deutlich später liegt als bei warm feuchtem Wetter.



Abbildung 7-50: Übersicht der erfassten Sprüh-, Bürst- und Schnittzeit





Wetterbedingung im Mittel über die 10 h vor Schnitt:

Abbildung 7-51: Untersuchung des Wettereinflusses auf den Schnittzeitpunkt bezogen auf den Sprühzeitstempel

Dabei zeigt sich dies auch grob in Abbildung 7-51, jedoch deutlich weniger ausgeprägt und mit Ausreißern. Dies kann verschiedene Gründe haben. Zum einen wird das Wetter in der Darstellung gemittelt über die 10 h vor dem Schnitt betrachtet. Dadurch entfallen ggf. Einflüsse wie kurzzeitiger starker Regen oder Sonnenschein. Auf der anderen Seite ist die Datenbasis noch relativ klein, sodass solche lokalen Einflüsse und Störungen im Mittel nicht ausgeglichen werden.

Zusätzlich wurde in Wittlich II eine Untersuchung der Festigkeit des Betons beim Schnitt durchgeführt. Dazu wurde ein Schmidt-Hammer von OAT verwendet. Dabei wurden bis zu 9 Messungen mit dem Schmidt-Hammer vorgenommen und der Mittelwert davon ist exemplarisch in Abbildung 7-52 dargestellt und die Standardabweichung ist durch die Balken angedeutet. Dabei sind die Festigkeitswerte in der oberen Darstellung über die Zeit aufgetragen. Da in dieser Darstellung Messungen an einem Tag teilweise überlagert sind, sind die Messungen in der unteren Darstellung zusätzlich einzeln aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Festigkeitswerte in der Regel bei ca. 11 liegen, jedoch durchaus auch streuen. Eine weitere Analyse dieser Daten steht jedoch noch aus.



Abbildung 7-52: Festigkeitsuntersuchung mit dem Schmidt-Hammer bei Schnitt

Insgesamt zeigt sich, dass die Onlinedatenerfassung über Formulare eine gute Akzeptanz auf der Baustelle erfahren hat und zur Erleichterung der Arbeitswege zur späteren Datenanalyse beiträgt sowie neue Erkenntnisse liefert. Dabei können erstmals durch die erfassten Daten Korrelationen zu anderen Prozessschritten hergestellt werden. Dies erfordert jedoch noch weitere Analyseschritte.

7.3.4 C3.4 - Aufbau und Implementierung der Applikationsplattform und Prozessleitebene "Live-View"

Aus den Erkenntnissen der Baustellenanalysen, sowie den erhobenen Messdaten und den Definitionen der ausgetauschten Prozessdaten können schon erste Konzepte des Leitstands evaluiert werden. Hierzu wurde bereits schon sehr früh im Forschungsvorhaben ein Konzept zum Austausch von Messdaten am Beispiel des OPC UA Protokolls und einer webbasierten Visualisierung in einer kleinen Testumgebung am ISYS vorgestellt und untersucht. Anhand dieser Technologie wurde ein konzeptioneller Aufbau der Applikationsplattform für den realen Baustellenablauf abgeleitet. Durch die Integration neuer Anforderungen muss die Plattform flexibel ausgelegt und ständig adaptiert werden.

In den folgenden Kapiteln werden kurz die betrachteten Konzepte der Testumgebung am ISYS und ein abgeleitetes Konzept für den Aufbau des zentralen Leitstands vorgestellt.

7.3.4.1 Erster Entwurf des Konzepts: Evaluierung eines konzeptionellen Aufbaus in einer Testumgebung

Beispielschnittstelle der digitalen Vernetzung zur Anwendung auf Industriesteuerungen

Die Schnittstelle OPC UA stellt nicht ein reines Datenaustauschformat dar, sondern bietet weit mehr Möglichkeiten. Hierbei ist die Grundidee analog zu der der objektorientierten Modellierung sowie zu den zentralen Aspekten der Webtechnologie. Dieses Zusammenspiel beider Technologien ermöglicht somit eine standardisierte Lösung zum strukturierten Datenaustausch in komplexen Prozessen sowie eine Integration in Cloud-Technologien. Hierbei erfüllen die Anforderungen des Protokolls neben dem strukturierten Informationsaustausch die Aspekte Plattformunabhängigkeit, Sicherheit und Skalierbarkeit.

Hierfür wird jeder Sensor, jeder Prozess und jede Maschine als eigenständiges Objekt abstrakt dargestellt und hierarchisch eingeordnet. Diese Objekte bestehen aus einer eigenen Datenstruktur (z.B. Messwerte, Variablen der Steuerung,) und können über Methoden (z.B. Einstellen von Parametern mit abhängigen Größen) beeinflusst werden. Weiter können Events durch das Verändern



Abbildung 7-53: Schematische Darstellung eines Datenobjektes in OPC UA

der Daten oder das Aufrufen von Methoden ausgelöst werden, welche eine Reaktion auf Änderungen erlauben (z.B. Alarm bei Überschreiten einer Grenze). Der Server stellt diese Objekte in einer hierarchischen Beziehung (Eltern-/Kindknoten) mittels aktueller Webtechnologie (TCP/IP, SSL, Benutzer-Authentifizierung, …) über eine Ethernet-Verbindung bereit. Eine schematische Darstellung der Objekte in OPC UA ist in Abbildung 7-53 gegeben und weitergehende Informationen können dem Artikel [RTA 2018] entnommen werden.

Im Kontext einer Baustelle und mit den Erfahrungen aus den Baustellenanalysen kann ein technischer Implementierungsvorschlag zur Integration der Teilnehmer auf Maschinenebene aus der Abbildung 7-54 entnommen werden. Hierbei ist ausschließlich die Kommunikation der Prozessteilnehmer zu einem zentralen Leitstand über das Internet notwendig. Dieser soll die Daten sammeln, auswerten und an weitere Prozessteilnehmer bei Bedarf verteilen. Dieses Konzept ist zunächst im kleineren Maßstab aufgebaut und evaluiert worden. Hierzu ist eine Testumgebung in Minimalausstattung mit einer Bachmann Industriesteuerung und einem PC aufgesetzt worden und die Schnittstelle mit verschiedenen Tools (Matlab, Python) angesprochen wurde.



Abbildung 7-54: Technischer Implementierungsvorschlag zur Kommunikation zwischen den Maschinen und dem Leitstand.

Konzept eines webbasierten HMI auf Basis einer Industriesteuerung

Um eine hohe Flexibilität bei der Darstellung des Baustellenfortschritts zu erreichen, soll auf eine reine Webtechnologie zurückgegriffen werden. Dies besitzt den Vorteil, dass prinzipiell jedes internetfähige Gerät mit einem Browser die Visualisierung anzeigen kann und zur Erweiterung der Funktionalität bereits viele fertige Bibliotheken (z.B. Karten- und Positionsdaten) zur Verfügung stehen.

Hierzu wurde eine exemplarische Visualisierung auf Basis einer Bachmann Steuerung mit dem Zusatzsoftwaremodul WebMI Pro aufgesetzt. Dies ermöglicht eine schnelle und einfache Erprobung der Toolchain. Hierbei wurde im Speziellen auf die Anwendbarkeit des Softwarepaketes im Kontext der "Live-View" Applikation geachtet. Es ist gelungen, eine einfache hierarchische Visualisierung zu implementieren, siehe Abbildung 7-55. Durch eine Benutzerkontensteuerung kann jeder Benutzer nur auf den Teil der Visualisierung zugreifen bzw. Daten schreiben, dem die entsprechenden Rechte zugeteilt wurden. Weiter wurde eine Bibliothek zum Interagieren von OpenStreetMap Kartendaten eingebunden und neben dem Darstellen der Kartendaten sowohl für die Ein- als auch die für Ausgabe genutzt werden. Diese Positionsdaten werden direkt in die Steuerung geschrieben bzw. gelesen und können über die OPC UA Schnittstelle ausgelesen bzw. geschrieben werden. Die Kommunikation mit dem Webinterface ist über ein Zertifikat gesichert. Somit werden die Daten nicht im Klartext verschickt.



Abbildung 7-55: Exemplarische Darstellungen der webbasierten Visualisierung (Links Baustellenübersicht, Mitte Informationen Fahrzeug, Rechts Beispiel Kartendaten).

Zur Integration der Ergebnisse aus Kapitel 7.3.4.1 kann im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens das in Abbildung 7-56 vorgeschlagene Konzept weiterverfolgt werden. Hierbei soll die Kommunikation auf der Maschinenebene über das OPC UA Protokoll realisiert und die Integration des Personals über ein Webinterface erreicht werden. Je nach verwendeter Messtechnik kann diese entweder über die Schnittstelle automatisiert oder manuell über das Webinterface eingebunden werden.



Abbildung 7-56: Technisches Implementierungskonzept der Applikationsplattform durch einen zentraler Leitstandsrechner.

7.3.4.2 Zweiter Entwurf: Visualisierung als webbasierte Datenbankanwendung

Im Gegensatz zum ersten Entwurf der Visualisierung auf einer Industriesteuerungsebene, soll jetzt eine webbasierte Datenbankanwendung realisiert werden. Dies ermöglicht nicht nur das reine Anzeigen der Daten, sondern auch eine Datenbank aufzubauen, welche genutzt werden kann, um weitergehende Analysen durchzuführen. Darüber hinaus eignen sich Industriesteuerungen nicht besonders gut, um eine Vernetzungsinfrastruktur über das Internet aufzubauen. Im Folgenden wird konzeptionell das Vorgehen zum Aufbau dieser Live-View Applikation als webbasierte Datenbankanwendung vorgestellt. Hierbei soll mittels der in Abschnitt 7.3.3.1 vorgestellten Hard- und Softwarearchitektur eine Echtzeitoberfläche entworfen. Für die Live-Anzeige des Baustellenfortschritts wird auf das gleiche Webentwicklungsframework wie zur Datenerfassung zurückgegriffen. Da sich der Aufbau der Datendarstellung noch in einem sehr frühen Stadium befindet und noch einige Definitionen der Art und Weise der Darstellung ausstehen werden in einem späteren Bericht an dieser Stelle weitere Einzelheiten des Aufbaus der Live-View Applikation vorgestellt.

Dieser Entwurf hat sich über den Berichtszeitraum bewährt. Jedoch ist dieser Ansatz sehr stark an die unterschiedliche Struktur der betrachteten Analysebaustellen aus Arbeitspaket A angepasst. Konzeptionell wurden auch alle Daten und Auswertungen genau auf die Datenbasis der Analysebaustellen optimiert und die Datenhaltung in der Datenbank für jede Baustelle einzeln aufgebaut. Dies bedeutet, dass jede zu untersuchende Baustelle immer neu implementiert werden muss. Dies ist ein erheblicher Aufwand, welcher zu Beginn jedoch notwendig war. D.h. es wurden wichtige Aspekte zu Baustellenprozessen gezielt untersucht und die relevanten Informationen zur Generalisierung einer einheitlichen Baustellenbetrachtung identifiziert. Auf diesen Erkenntnissen wurde der dritte Entwurf *zentrale Echtzeitprozessteuerung BF4.0 WebApp* entwickelt, welche alle erfassten Baustellen auf dieselbe Art und Weise erfasst, aufbereitet, präsentiert und analysiert.

(Das bedeutet, dass viele der gezeigten Screenshots von dem zweiten Entwurf sind. Dies ist aus inhaltlicher Sicht nicht tragisch, da diese Funktion, sofern sie für den Echtzeitbetrieb und Analyse der Baustellen wichtig sind, in den neuen Entwurf portiert wurden.)

7.3.4.3 Zentrale Echtzeitprozesssteuerung BF4.0 WebApp

Auf Basis der Erkenntnisse des ersten und zweiten Entwurfs wurde eine weitere WebApplikation aufgebaut. Diese abstrahiert die Prozesse der untersuchten Baustellen und vereinheitlicht die Baustellendokumentation und den Informationsfluss auf der Baustelle. Neben den manuell zu erfassenden Daten werden auch die Maschinenschnittstellen integriert. Diese Applikation wurde sukzessive weiterentwickelt und um neue Aspekte ergänzt.

Eine schematische Darstellung des Konzeptes zur Baustellenvernetzung und der Integration der verschiedenen Prozessteilnehmer in die WebApplikation ist in Abbildung 7-57 gegeben. Hierbei wurden Echtzeitschnittstellen zu allen Maschinen auf der Baustelle geschaffen, welche einen automatisieren Datenaustausch ermöglichen. Die manuell zu erfassenden Informationen werden über entsprechende Formulare erfasst. Darüber hinaus wird dem Personal über Übersichtsseiten der Ist-Stand auf der Baustelle präsentiert und wichtige Informationen zum Download bereitgestellt.



Abbildung 7-57: Konzept Baustellenvernetzung.

Die Hauptaufgaben der BF4.0 WebApp sind auf der Datenerfassungsseite die Realisierung aller Maschinenschnittstellen (Mischanlage, Materiallogistik, Fertiger, Nachbearbeitungsfuhrpark) und das systematische Einsammeln aller manuell zu erfassenden Daten (Frischbetonbeprobung, Frischbetonbeurteilung, Nachbearbeitungsprotokolle für Sprühen, Bürsten und Schneiden). Auf der Informationsmanagementseite wird dem Nutzer ein Echtzeiteinblick in die Baustelle gewährt, die Informationen aus verschiedenen Quellen zusammengeführt, aufbereitet und angezeigt sowie auf unterschiedliche Weise (Tabellen, Karten, Diagramme) die Datenbestände angezeigt, gefiltert und zum Export angeboten. Einen groben Einblick in den Aufbau der Benutzerführung der BF4.0 WebApp gibt ein Zusammenschnitt des Navigationsmenüs in Abbildung 7-58. In blau werden kurze Erklärungen zu der Funktion der entsprechenden Seiten gegeben.

A Betonfahrbahn 4.0	Baustellenübersicht	Generelles 🕶	Betonherstellung -	Einbau 🔻	Nachbearbeitung 🕶	Mustermann 👻
Übersichtsseite schiedenen Ba	en der ver- ustellen	Baustellen Rezepturer Logistik Fal Telematik S Telematik B	Allger Allger Logist Schlüssel Buchungen	meine Ba ik Schnit natikschr	austelleninforma ttstelle nittstelle der Na	ation chbearbeitung
A Betonfahrbahn 4.0	Baustellenübersicht	Generelles -	Betonherstellung -	Einbau 🔻	Nachbearbeitung 🗸	Mustermann 🔻
Mischanlagen Liefers Manuelle Frischbeto	scheintabelle & I ndatenerfassun	Export — g & Export «	 Chargenprotokolle Frischbetonprotok Frischbetonbeurte 	e colle eilungen		
A Betonfahrbahn 4.0	Baustellenübersicht	Generelles 🕶	Betonherstellung -	Einbau 🔻	Nachbearbeitung 👻	Mustermann 👻
Fertigertelematik: [Daten & Export &	& Kartenda	rstellung	 Einbaus Übersic 	tationen ht Einbaustationen	
🗚 Betonfahrbahn 4.0	Baustellenübersicht	Generelles 🔻	Betonherstellung -	Einbau 🔻	Nachbearbeitung -	Mustermann 👻
Kartenübersicht der r Manuelle Nachbearb	nanuellen Proto eitungsprotokol	kolle 🗕	& exportieren		 Übersichtskarte Sprühprotokolle Bürstprotokolle Schnittprotokolle 	_
A Betonfahrbahn 4.0	Baustellenübersicht	Generelles 🕶	Betonherstellung 🔻	Einbau 🔻	Nachbearbeitung 🔻	Mustermann 👻
Benutzerkontenve	rwaltung				Passwor Auslogg	rname ändern t ändern jen

Im Folgenden werden kurze Einblicke in die Übersichtsseiten, die Erfassung der manuellen Daten und der Logistikschnittstelle gegeben. Ausdrucke zu den gezeigten Seiten sind im Anhang als Anlage 1 - 5 dieses Berichtes enthalten.

Abbildung 7-58: Navigation BF4.0 WebApp

7.3.4.3.1 Echtzeit Übersichtsseiten der Prozessschritte

A Betonfahrbahn 4.0 Baustellenüb	ersicht Generelles 🕶 Betonherstellur	ng 👻 Einbau 🍷 Nachbearbeitung 🍷 Mustermann 👻					
Prozessleitsystem Betonfahrbahn 4.0							
Baustelle: A1 Wittlich - Hasborn	(2656)	Zur Übersicht					
Allgemeine Informationen							
Zeitraum: 4. November 2020 - 23. Nover Einbautage: 14	nber 2020						
Betonherstellung	Einbau	Nachbearbeitung					
Zur Übersicht	Zur Übersicht	Zur Übersicht					
gesamt: 6929 Chargen / 17320.0 m ³ 631121: 5061 Chargen / 12652.5 m ³ 612121: 1868 Chargen / 4667.5 m ³ 79 Frischbetonbeprobungen 121 Frischbetonbeurteilungen	20655 Einbaustationen	123 Sprühprotokolle 53 Bürstprotokolle 39 Schnittprotokolle					

Abbildung 7-59: Ausschnitt aus der Baustellenübersicht der BF4.0 WebApp.

Die erste Seite "Baustellenübersicht" der BF4.0 WebApp gibt eine Übersicht über alle erfassten Baustellen. Hier bekommen die Nutzer einen ersten Einblick, welche Baustellen aktuell bearbeitet werden und welche Baustellen in der Vergangenheit begleitet wurden. Für eine Beispielbaustelle ist diese Übersicht in Abbildung 7-59 gezeigt. Weiter gibt es eine kurze Zusammenfassung über die Eckdaten der Baustelle. Diese Seite dient außerdem über die Schaltfläche "Zur Übersicht" als Einstiegspunkt für die Echtzeit- und Analyseseiten der einzelnen Baustellen mit den zugehörigen drei Hauptübersichten für die Betonherstellung, den Einbauprozess und die Nachbearbeitung zur Echtzeitanzeige, sowie ein Einblick in die vergangenen Baustellentage. Es werden allgemeine Kennzahlen für den gesamten Zeitraum der Baustelle, wie bspw. das gesamte Betonvolumen oder die eingebaute Strecke, dargestellt sowie deren aktuelle Werte tageweise aufbereitet.

Für die Betonherstellung haben sich das produzierte Betonvolumen und die Stundenleistung während der Produktion als wichtige Kennwerte zur Bewertung eines Tages erwiesen. Weiter gibt das produzierte Betonvolumen über der Zeit dargestellt direkt einen Hinweis auf einen reibungslosen Ablauf. Die umgeschlagenen Materialien in tabellarischer Form zeigen Abweichungen, welche ggf. in der folgenden Planung berücksichtigt werden müssen. Abbildung 7-60 zeigt den entsprechenden Abschnitt der Übersichtsseite der Betonherstellung.





Umgeschlagene Materialien vom 12.11.2020

Hier sind die umgeschlagenen Trockenmassen aufgelistet. D.h. es wurden aus allen Materialien der in der Mischanlage eingestellte Feuchtewert abgezogen. Das Feuchtewasser wird nicht auf das Frischwasser aufgeschlagen. Das heißt, dass das gewogene Wasser kleiner als der durch das Rezept geplante Wert ist.

	631121	612121	gesamt (Rezept)	gesamt (gewogen)
0/4	699.3	254.2	955.3	953.5
16/22	848.1	0.0	848.2	848.1
2/8	360.9	0.0	357.1	360.9
5/8	0.0	637.4	637.5	637.4
8/16	699.9	0.0	699.9	699.9
CEM1 42,5	447.8	205.7	653.4	653.5
LP	3.8	1.6	5.5	5.5
vz	0.0	0.0	0.0	0.0
W2	156.3	73.6	283.8	229.9

*Alle Mengenangaben sind in Tonnen.

Abbildung 7-60: Betonherstellung Tagesleistung



Abbildung 7-61: Betonherstellung Produktionshistorie

Um den aktuellen Tag bzw. die Tage mit Unregelmäßigkeiten direkt einzuordnen, zeigt die Produktionshistorie in Abbildung 7-61 das produzierte Volumen, welches tageweise nach Rezept aufgeschlüsselt und über alle erfassten Produktionstage dargestellt ist.

Analog zur Betonherstellung wird der Einbauprozess anhand der Tagesleistung mittels der Kennwerte der eingebauten Strecken und Einbaugeschwindigkeit beurteilt. Weiter bietet die Einbaustrecke über die Zeit einen Einblick in die Standzeiten oder Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf. Die Einbauhistorie zeigt die zurückgelegten Strecken über die verschiedenen Einbautage. Diese ist länger als die reale Einbaustrecke, da aktuell noch die Ein- und Ausfahrgänge in den Daten enthalten sind und nicht herausgerechnet werden können. Die entsprechenden Diagramme sind der Abbildung 7-62 und Abbildung 7-63 zu entnehmen. Zu beachten ist, dass es abweichende Werte zur Betonherstellung gibt, da das Telematik System des Fertigers am 11.11. ganztags und am 23.11 halbtags ausgefallen ist. Am 14.11. und 19.11 sind in der Anzeige noch Statusmeldungen des Telematik Systems enthalten.



Abbildung 7-62: Einbauprozess Tagesleistung



Abbildung 7-63: Einbauprozess Einbauhistorie

In Abbildung 7-64 sind die erfassten Positionen des Fertiger als schwarze Linie in einer Karte dargestellt. Es kann anhand des Zeitschiebers die aktuell ausgewählte Position des Fertiger (Pin) zu jeder beliebigen Zeit nachvollzogen werden. Lücken in der Trajektorie des Fertigers wurden durch den Telematikausfall verursacht.



Abbildung 7-64: Einbauprozess Kartendarstellung mit Zeitauswahl

Für die Demonstrationsbaustelle liegen die Planungsdaten des Fahrbahnverlaufs entlang der Baustellenstationen vor. Werden diese Planungsdaten genutzt um den zeitlichen Fortschritt des ein Einbaus, wie in Abbildung 7-65 gezeigt und in Abschnitt 7.2.4.2 beschrieben, darzustellen, kann zum einen der Fortschritt der Baustelle für das Baustellenpersonal anschaulich anhand der Baustellenstationierung dokumentiert werden. Zum anderen können die Maschinendaten direkt mittels der Baustellenstation mit Beobachtungen oder Messungen verglichen werden.



Abbildung 7-65: Einbauprozess Baustellenfortschritt

Als interessante Information für die Nachbearbeitungsprozessschritte hat sich der zeitliche Ablauf der Baustelle, im Speziellen verglichen zum Sprühen, herausgestellt. Daher ist für die Übersichtsseite der Nachbearbeitung in Abbildung 7-66 der zeitliche Fortschritt der Sprühbühne (rot) zusammen mit dem der Bürst- und Schneidmaschinen dargestellt.



Abbildung 7-66: Nachbearbeitung Baustellenfortschritt (rot: Sprühbühne, grün: Bürsten, blau: Schneiden)

Die Echtzeitaufbereitung der erfassten Protokolle erfolgt in Übersichtsseiten, bei denen schichtweise anhand von einem Tagesfilter die drei Protokolle für das Sprühen, Bürsten und Schneiden auf einer Seite tabellarisch dargestellt werden.

7.3.4.3.2 Manuelle Datenerfassung

Bei der manuellen Datenerfassung wurde besonderen Wert auf die Erfassung aller notwendigen Metadaten gelegt, damit die verschiedenen Datenquellen (Maschinen, manuelle Daten, chargenbezogen, stationsbezogen) möglichst gut zueinander passen. Dies bedeutet für die Erfassung aller Frischbetonbetonmesswerte und -bewertungen durch das Personal, dass diese per Dropdown (vgl. Abbildung 7-67) eindeutig einer der letzten Chargen aus der Mischanlage zugeordnet werden. Somit liegen implizit alle Details aus der Mischanlage vor. Da die Frischbetonbewertungen sowohl an der Mischanlage als auch am Fertiger erfasst wurden, kann noch zusätzlich das Fahrzeug notiert werden.

Charge	26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3	~
Zeitstempel	26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3	
	26.11.2020 14:33:32 [GA930609-1-82877-100008253] 612121 2.0m3	
	26.11.2020 14:33:32 [GA930609-2-82878-100008253] 612121 2.0m3	- 1
Probekörper	26.11.2020 13:24:16 [GA930609-2-82876-100008252] 612121 2.5m3	- 1
	26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-82874-100008252] 612121 2.5m3	- 1
Lufttemperatur	26.11.2020 13:23:32 [GA930609-1-82875-100008252] 612121 2.5m3	- 1
cartternperatur	26.11.2020 12:11:07 [GA930609-1-82873-100008251] 612121 2.5m3	- 1
	26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-82872-100008251] 612121 2.5m3	- 11
Betontemperatur	26.11.2020 12:10:30 [GA930609-1-82871-100008251] 612121 2.5m3	
	26 11 2020 11:25:43 [GA930609-2-82870-100008250] 612121 2 5m3	
Konsistenz	26 11 2020 11:24:58 [GA930609-2-82868-100008250] 612121 2.5m3	
KOH313CCH2	26 11 2020 11:24:58 [GA030609-1-82869-100008250] 612121 2 5m3	
	26.11.2020 11:02:07 [GA930609-1-02003-100000230] 612121 2.5m3	
Prüfmethode	26.11.2020 11:02:11 [GA030600 3 82866 100008240] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 11.02.11 [GA930609*2*62600*100006249] 012121 2.5115	
Luftnorongeholt	26.11.2020 11:02:10 [GA930609-1-82865-100008249] 612121 2.5m3	
Luntporengenan	26.11.2020 09:18:16 [GA930009-2-82864-100008248] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 09:17:32 [GA930609-1-82863-100008248] 612121 2.5m3	
Rohdichte	26.11.2020 09:17:31 [GA930609-2-82862-100008248] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 08:12:29 [GA930609-1-82861-100008247] 612121 2.0m3	Ŧ

Abbildung 7-67: Dropdown zur Chargenzuordnung

Bei der manuellen Datenerfassung für die Nachbearbeitung werden zusätzlich die Baustellenstation und der Standort des Eingabegeräts erfasst. Der Standort des Eingabegeräts ist jedoch als zu Ungenau für die weitere Verwertung im Projekt.

7.3.4.3.3 Logistik Schnittstelle

Da es aufgrund wechselnder Vertragspartner und somit wechselnder Schnittstellentechnologien besonders schwer ist, die bestehende Telematik Infrastruktur der Logistikfahrzeuge zu nutzen, wurde bei der Demonstrationsbaustelle ein anderer Ansatz erprobt. Es wurde mittels einer App auf dem Smartphone oder Tablet der Fahrer der Standort zyklisch an die BF4.0 WebApp gemeldet. Somit konnte auf der Demonstrationsbaustelle für die verschiedenen Fahrzeuge der Standort anhand einer Karte nachvollzogen werden (vgl. Abbildung 7-68). Diese Daten bilden das Bindeglied zwischen der Betonherstellung und dem Einbau.



Abbildung 7-68: Übersichtskarte der Logistikfahrzeuge (UB = Unterbetonkipper, OB = Oberbetonkipper)

Dieser Entwurf einer zentralen Echtzeitprozesssteuerung als BF4.0 WebApp mit den Maschinenschnittstellen wurde an Schwerpunktbaustellen erfolgreich sukzessive Stück für Stück aufgebaut und in Betrieb genommen.

Beispielsweise wurde das Protokollwesen zur Qualitätssicherung an der A1 Wittlich II erstmals getestet und validiert. Die Mischanlagenschnittstelle an der Maßnahme A81 Cleversulzbach in Betrieb genommen. Bei den Maßnahmen A81 Cleversulzbach und A5 St. Leon-Rot wurde die Telematikschnittstelle entwickelt und die Auswertung der positionsbezogenen Daten seitens der Nachbearbeitung erarbeitet und integriert. Die finale Demonstration und Validierung aller Schnittstellen und der Echtzeitprozesssteuerung BF4.0 WebApp erfolgte an dem ersten Demonstrator A1 Wittlich-Hasborn.

7.4 ARBEITSPAKET C4 – VALIDIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG

Die erarbeiteten Konzepte, Messtechniken und Verfahrensschritte zur Herstellung von Betonfahrbahnen nach Betonfahrbahn 4.0 wurden in diesem Arbeitspaket unter idealen Bedingungen im Technikum Aachen validiert, implementiert und optimiert.

7.4.1 C4.1 - Analyse der Fahrbahnoberfläche: Ebenheit, Eigenschaften des Betons und des Fertigers sowie der Rheologie auf die Betonqualität

8 ARBEITSSCHWERPUNKT D - BETONFAHRBAHN 4.0 IN DER BAUPRAXIS

8.1 ARBEITSPAKET D1 – ERPROBUNG UND VALIDIERUNG AN REALEN DEMONSTRATOREN

Nach der Analyse und Optimierung der einzelnen Prozessschritte der Betonfahrbahnherstellung (Arbeitsschwerpunkt B), in die die Erkenntnisse des Arbeitsschwerpunktes A eingearbeitet wurden, wie auch nach der Implementierung von Automatisierungskonzepten zur Qualitätssicherung und der anschließenden digitalen Vernetzung zur prozessoptimierenden Kommunikation aller Systemkomponenten (Arbeitsschwerpunkt C), soll im Arbeitsschwerpunkt D ein Gesamtsystem realisiert werden, das weit über die heutigen Möglichkeiten der Betonfahrbahnherstellung hinaus über den gesamten Baustellenfortschritt hinweg erlaubt, die für den Einbau und die Verdichtung des Fahrbahnbetons mit dem Gleitschalungsfertiger maßgebende Soll-Anforderung an die einbaugerechte Steife des Frischbetons sicherzustellen. Mit der Übertragung aller im Vorhaben erzielten Forschungsergebnisse in die Baupraxis der Betonfahrbahnherstellung soll damit die Basis geschaffen werden, die im Bundesverkehrswegeplan 2030 angeführten Qualitätsanforderungen an die Betonfahrbahnherstellung einhalten zu können.

Der erste Demonstrator auf der A1 Wittlich-Hasborn zur Validierung des Prozessleitsystems mit voller Funktionalität und der Demonstration der bisherigen Optimierungen konnte wie geplant im Herbst 2020 durchgeführt werden. In den Unterkapiteln werden die weitere Einzelheiten und Information präsentiert.

8.1.1 D1.1 - Auswahl, Planung und Vorbereitung der als Demonstratoren vorgesehenen 2 Fahrbahnabschnitte

Im Zuge des Forschungsvorhabens ist die Herstellung zweier Demonstrationsstrecken zur Validierung der erarbeiteten Konzepte vorgesehen. Neben den zeitlichen Zwangspunkten aus dem Forschungsvorhaben heraus galt es hierfür geeignete Strecken aus dem Auftragsbestand der Firma Schnorpfeil zu detektieren. Hierbei war zu berücksichtigen, dass die Belieferung aus der eigenen Liebherr-Baustellenanlage erfolgt, um bereits zahlreiche Informationen aus der Produktion zu generieren. Des Weiteren soll der Einbau 2-lagig auf einer Länge von ca. 500 m erfolgen. Neben der ursprünglich vorgesehenen Waschbetonoberfläche ergab sich die Möglichkeit beim zweiten Demonstrator die Oberfläche mittels Grinding und anschließendem Grooving herzustellen, so dass zusätzliche Informationen gewonnen konnten. Die Rezeptierung des Fahrbahnbetons erfolgte im Boden-, Beton- und Straßenbaulabor der Firma Schnorpfeil nach den Anforderungen des Bauvertrages und den TL Beton-StB 07/13. Um eine einheitliche Datenlage zur Frischbeton-Rheologie zu erhalten, wurden für die Versuchsmischungen der Uni Stuttgart die identischen Ausgangsstoffe verwendet.

8.1.1.1 Erste Demonstrationsbaustelle: A1 Wittlich-Hasborn

Als erste Demonstrationsbaustelle, welche die bisherigen Fortschritte in der Optimierung des Prozessablaufs sowie insbesondere der Digitalisierungsschnittstellen darstellen soll, wurde die Baumaßnahme auf der A1 zwischen der AS Wittlich und der AS Hasborn in Fahrtrichtung Koblenz gewählt. Der zweischichtige Einbau mit zwei Gleitschalungsfertigern (Wirtgen SP94i), der Doppelmischanlage (2x Liebherr MobilMix 2.5 m³) sowie die Nachbearbeitung durch die Firma OAT erfolgte vom Mittwoch, den 4. November, bis zum Montag, den 23. November 2020. Der Streckenverlauf der gesamten Baumaßnahme ist in Abbildung 8-1 dargestellt und umfasst eine Gesamtlänge von 5,4 km. Es wurde, auf Basis der Erkenntnisse im Forschungsvorhaben, die Herstellung der gesamten Strecke dokumentiert, die bisherigen Veränderungen an den Maschinen demonstriert sowie der Fortschritt der Digitalisierung auf der Baustelle gezeigt. Als Schwerpunkt für alle Datenerhebungen, die wie beispielsweise die gesonderte Bohrkernentnahme nicht kontinuierlich oder automatisiert erfolgen können, wird der Streckenabschnitt des Begehungstages am 16. November mit einer Einbaulänge von ca. 510m ausgewählt.

Baustellenkennwerte 1. Demonstrator

Zeitraum Betoneinbau	04.11.2020 bis 23.12.2020					
Herstellung Demonstrator	16.11.2020					
Fahrbahnaufbau	2-schichtig, 6 cm Oberbeton, 20 cm Unterbeton, Waschbetonoberfläche Höhenabtastung: beidseitig mit Fahrdraht, Pinnabstand 5 m					
Unterlage Fahrbahnbeton	10 cm Asphalttragschicht AC 22 TS					
Betonzusammensetzung						
Unterbeton	C 30/37, XC4, XD3, XF4, XM2, C1, Dmax = 22mm					
Oberbeton	C 30/37, XC4, XD3, XF4, F2/F1, Dmax = 8mm					
Zement	CEM I 42,5 N					
Geräteeinsatz	Liebherr MobilMix 2.5-F – Tandemanlage (2 Stück) Wirtgen Gleitschalungsfertiger (2 Stück), hiervon 1 x mit Dübelsetzer					
Transportfahrzeuge	Sattelkipper					
Transportentfernung	im Mittel 8 km					
Oberflächenbearbeitung	Radlader mit Bürstenausbau zum Entfernen des Oberflächenmörtels					
Fugenherstellung	Fugenschneider für Quer- und Längsfugen					
Vermessung	Messfahrzeug Lehmann+ Partner					



Abbildung 8-1: Lage der Baumaßnahme, gesamte Strecke (blau) und Strecke am Demonstrationstag 16.11.2020 (rot).

Zum Zeitpunkt des ersten Demonstrators konnten noch nicht alle Umrüstungen der Maschinen stattfinden. Daher soll, neben den Optimierungen der Mischanlage und den Ebenheitsmesssystem am Fertiger, ein besonderes Augenmerk auf die Erprobung der Digitalisierung und der Integration der Maschinenschnittstellen gelegt werden. Hierfür wurde die im Forschungsvorhaben entwickelte webbasierte Anwendung *BF4.0 WebApp* als übergeordnetes Echtzeit-Prozessleitsystem eingesetzt sowie die neu entwickelten Schnittstellen des gesamten Maschinenfuhrparks auf der Baustelle (Mischanlage, Fertiger, Sprühbühne, Bürsten, Schneidmaschinen) erweitert und eine Logistikschnittstelle zur App-basierten Erfassung der Materiallogistik realisiert. Dieses System dient als zentrales Live Informationsmanagementsystem auf der Baustelle und wurde über den gesamten Zeitraum erprobt und kontinuierlich verbessert. Eine genauere Aufstellung der verschiedenen Funktionen und Aufbereitungen wird in Abschnitt 7.3.4.3 vorgestellt. Auf diese Weise wird die Baustelle vollständig digital begleitet und ein ganzheitlicher Datensatz, welcher eine Rückverfolgbarkeit des Materialflusses sowie weiterführende Analysen ermöglicht, aufgezeichnet werden.

7.1.1.2 Zweite Demonstrationsbaustelle: A61 Boppard-Waldesch

Als zweite Demonstrationsbaustelle hat sich ein Teilabschnitt einer Maßnahme auf der A61 zwischen der AS Boppard und der AS Waldesch angeboten. Dadurch das im angrenzenden Bereich eine Versuchsstrecke für eine durchgängig bewehrte Betondecke – DBB - als Horizontalhybrid (Prinzip "Beton an Asphalt") erstellt wurde, hat neben dem vorab angesprochenen zeitlichen Einbaufenster dafür gesprochen. Hierdurch ergaben sich zahlreiche Synergieeffekte. Beispielsweise wurden erweiterte Prüfungen, wie z. B. ein Schwindversuch, mit der gewählten Betonrezeptur durchgeführt, oder zusätzlich zu den Ebenheitsmessungen mittels Planographen wurde durch die Firma Lehmann + Partner nicht nur die fertige Oberfläche sondern auch die Unterlage vor der Überbauung digital erfasst. Des Weiteren wurden im Bereich der Plattenbauweise verschiedene Fugengeometrien ausgeführt, um auch hier Erkenntnisse zum akkustisch optimalen Faswinkel zu gewinnen. Die Bewertung erfolgt nicht im Zuge dieses Forschungsvorhabens.

Baustellenkennwerte 2. Demonstrator

Zeitraum Betoneinbau	15.07.2021 bis 16.08.2021
Fahrbahnaufbau	09.08.2021 2-lagig, d = 26 cm, Ebenheitsgrinding mit anschließendem Grooving Höhenabtastung: rechts mit Fahrdraht, Pinnabstand 5 m, links Abtastung Binderschicht
Unterlage Fahrbahnbeton	10 cm Asphalttragschicht AC 22 TS
Betonzusammensetzung Zement	C 35/45, XC4, XD3, XF4, XM2, C1, Dmax = 22mm CEM III/A 42,5 N
Geräteeinsatz	Liebherr MobilMix 2.5-F Wirtgen Gleitschalungsfertiger (2 Stück), hiervon 1 x mit Dübelsetzer
Transportfahrzeuge	Sattelkipper
Transportentfernung	im Mittel 8 km
Oberflächenbearbeitung	Grinding + Grooving
Fugenherstellung	Fugenschneider für Quer- und Längsfugen
Vermessung	Messfahrzeug STIER (1x Unterlage, 1x Beton ohne Oberflächenbearbeitung 1x nach Grinding + Grooving)



Abbildung 8-2 Ausschnitt aus Betoneinbauplan



Abbildung 8-3: Baufeld nach Herstellung der Frostschutzverfestigung als Unterlage für die Asphalttragschicht



Abbildung 8-4: Asphalttragschicht vor Einbau der Betonfahrbahn, Binderfläche als Referenz für den Fahrbahnbeton



Abbildung 8-5: Asphalttragschicht vor Einbau der Betonfahrbahn, Binderfläche als Referenz für den Fahrbahnbeton -Fahrbahnbeton

Plattenfeld Nr. 61 wurde zunächst durchgebaut und dann für die Ausbildung zweier Raumfugen rückgebaut. Hierdurch wurde es der MPA Stuttgart möglich umfangreiche Prüfungen zur Dokumentation des Erhärtungsverlaufs durchzuführen. Parallel wurden auf diesem Plattenfeld bewusst zu früh begonnen, Schneidversuche durchzuführen, um eine Korrelation zwischen den Messergebnissen und dem idealen Schneidzeitpunkt zu gewinnen.



Abbildung 8-6: Zerstörungsfreie Prüfung der Festigkeitsentwicklung

Durch die Möglichkeit der Rückverfolgbarkeit einzelner Produktionschargen über die BF 4.0 WebApp war es möglich eine gezielte Sichtkontrolle durchzuführen bzw. einzelne Chargen mit den Standardlaborverfahren zu prüfen. Neben einer subjektiven Bewertung der Einbaufähigkeit wurde der Luftporengehalt sowohl an der Anlage wie auch auf der Baustelle mit dem Druckausgleichsverfahren geprüft. Zwischen beiden Entnahmestellen ergaben sich nur geringfügige Abweichungen.



Abbildung 8-7: Veränderung LP-Gehalt über die Baustellen



Abbildung 8-8: Einbau Oberbeton mit nachgeführtem Finisher zur Verbesserung der Längsebenheit



Abbildung 8-9: unten rechts Raumfuge (Abgrenzung des Raumfugenfeldes), oben rechts Scheinfuge, links Oberfläche gegrindet und gegroovt

8.1.1.2 Längsebenheit

Da die Längsebenheit einen signifikanten Einfluss auf den Fahrkomfort hat war es das Ziel dieses Kriterium gegenüber dem ersten Demonstrator weiter zu verbessern. Hierzu wurde jede Einbauschicht nach der Herstellung mittels Planographen befahren. Anhand der Aufzeichnungen konnte festgestellt werden, dass die Ebenheit von unten nach oben je Einbauschicht deutlich verbessert werden konnte. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass Unebenheiten in der Asphalttragschicht nicht zwangsweise in die Oberfläche der Betondecke kopiert werden, da für die Betondecke die Höhenreferenz (Leitdraht bzw. angrenzende Einbaufläche) maßgeblich für die Ebenheit ist. Unebenheit aus handwerklichen Gründen (wie z. B. Tagesansätze) oder aus konstruktiven Gründen (z. B. Herstellung von Raumfugenfeldern) sind jedoch auch hierbei letztendlich nicht vermeidbar. Erst durch einen nachfolgenden Arbeitschritt, wie z. B. dem Ebenheits-Grinden kann die

Längsebenheit prozesssicher verbessert werden.



Abbildung 8-10: Veränderung der Längsebenheit je Einbauschicht

8.1.2 D1.2 - Umbau der Antriebsstränge der bei den Demonstratoren zum Einsatz kommenden mobilen Mischanlage zur rheologiegestützten Mischprozessführung

8.1.2.1 Erste Demonstrationsbaustelle: A1 Wittlich-Hasborn

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde die Mischanlage sukzessiv weiterentwickelt. Dazu wurden neben einer neuen Schnittstelle zum Echtzeitdatenaustausch mit dem übergeordneten Prozessleitsystem BF4.0 WebApp auch Anpassungen an der Mischanlage vorgenommen.

8.1.2.1.1 Erprobung der kontinuierlichen Verbesserung während der Laufzeit des Projekts

Die baulichen Veränderungen, welche seit der Entwicklung im Baustelleneinsatz eingesetzt werden, werden in diesem Zusammenhang kurz dargestellt.

8.1.2.1.1.1 Prallblech Feuchtesensorik

Zur Verbesserung der Erfassung der Feuchte der Ausgangstoffe wurde eine Optimierung der Prallblechgeometrie im Materialauslauf vorgenommen. Hierdurch konnte die Messung der aktuellen Feuchte verbessert werden und so eine exaktere Kompensation der Ausgangsfeuchte erreicht werden.



Abbildung 8-11: Prallblech zur Verbesserung des Materialflusses über die Feuchtesonde

Diese Änderung zusammen mit der einfacheren Kalibrierung der Sonden führte dazu, dass im Gegensatz zum Beginn des Forschungsvorhabens die Feuchteautomatik gern genutzt wird, wodurch sowohl der Mischmeister entlastet als auch eine gleichmäßigere Wasserdosierung erreicht wird. Dadurch ist zu erwarten, dass geringere Schwankungen der Feuchte des fertigen Betons erreicht werden können. Weitere Informationen können in Abschnitt 6.1.1.2 entnommen werden.

8.1.2.1.1.2 Optimierung der Ausstoßleistung

Kontinuierliche Verbesserungen führten im Rahmen des Projektes zu einer Steigerung der Ausstoßleistung der Mischanlagen. Die Ausstoßleistung des Mischers konnte durch eine Optimierung des Ablaufprogramms und der Synchronisierung der Arbeitsschritte erhöht werden. Zusammen mit einer Erhöhung der Mischerdrehzahl durch die Anpassung des Übersetzungsverhältnisses der Riemenscheiben im Antriebstrang des Mischers konnte damit die Ausstoßleistung des Mischers um ~50% erhöht werden. Dies kann anhand der Baumaßnahme Wittlich I zu Beginn des Projektes und dem Demonstrator A1 Wittlich-Hasborn gesehen werden. Es wurde an einem guten Einbautag in Wittlich I eine Ausstoßleistung von 128,32 m³/h und ein Produktionsvolumen von 875 m³ erreicht werden. Auf dem Demonstrator A1 Wittlich-Hasborn konnte an einem guten Tag eine Ausstoßleistung von 189,24 m³/h und ein Produktionsvolumen von 1805 m³ erzielt werden



Abbildung 8-12: Riemenscheiben im Mischer

8.1.2.1.1.3 LWS4 mit OPC-UA Schnittstelle

Die Steuerung der Mischanlage wurde auf den neu entwickelten Messverstärker LWS4 umgestellt. Dies ermöglicht eine verbesserte Abtastrate des Mischprozesses von 200Hz. Somit ist eine genauere Dosierung der Einzelkomponenten durch eine verbesserte Abschaltlogik des Systems möglich. Ebenso konnte durch die höhere Rechenleistung des LWS4 die Prozesszyklus- und Wartezeiten reduziert werden.

Die neue Generation Messverstärker verfügt neben den vorherigen Datenschnittstellen über einen OPC-UA Server über den die Prozessinformationen abgerufen und von dritter Stelle weiterverarbeitet werden können.

8.1.2.1.1.4 Umsetzung zentraler Leitstand

Im Rahmen der Umsetzung LWS4 wurde die Doppel-Mischanlage auf eine zentrale Leitstandssteuerung umgestellt. Dieser zentrale Leitstand ermöglicht einen automatisierten teilsynchronisierten Betrieb der beiden Mischanlagen. Durch weitere Funktionen und Vereinfachungen konnte so der Mischmeister entlastet werden. Dies ermöglicht es dem Mischmeister sich dem Management des Gesamtprozesses zu widmen, anstatt sich auf das Auslösen einzelner Aufträge konzentrieren zu müssen. Wichtig bei der Implementierung war die flexible Umsetzung des Systems, um eine einfache Umstellung der Steuerung auf einen Einzelanlagenbetrieb zu ermöglichen.



Abbildung 8-13: HMI der zentralen Leitstandssteuerung

8.1.2.1.2 Integration der Betonherstellung in das Prozessleitsystem

8.1.2.1.2.1 Datenschnittstelle der Mischanlage in die B4.0 WebApp

Ein wichtiger Meilenstein im Forschungsvorhaben sind die digitalen Lieferscheine der Mischanlage. Diese konnten mit der Datenschnittstelle der Mischanlage in das Prozessleitsystem BF4.0 WebApp integrierte werden. Zusätzlich können auf diesen Informationen direkt die manuelle Qualitätsdokumentation sowie die Erfahrungswerte des Baustellenpersonals direkt den entsprechenden Chargen der Mischanlage zugeordnet werden.

Der Betrieb der Datenschnittstelle lief zu Beginn der Maßnahme noch sehr unzuverlässig, da die Internetabdeckung im Bereich der Baustelle schlecht ist. Somit wurden anfangs nicht alle Chargen übertragen. Außerdem wurden keine Lieferscheinnummern zur Identifikation einer LKW Ladung übertragen. Beide Probleme wurden während der Laufzeit durch eine Anpassung der Schnittstelle behoben. Somit funktionierte die Echtzeitübertragung bei einer Internetverbindung zufriedenstellend.

III B	40DataBasePusher						_		×
Id	Production Date	Start Time	Disc End	Time	Mix D	esign	Quant	ity	
							1		
	Start Dat	um: 01.12.2	2020		15 Refr	esh E	Batches		Cylic
							Rece	ived Bat	tches:0/0

Abbildung 8-14: Benutzerinterface der Datenschnittstelle an der Mischanlagensteuerung

8.1.2.1.2.2 Manuelle Qualitätssicherung bei der Betonherstellung

Während der Durchführung der Baustelle wurde bei der manuellen Dokumentation besonderen Wert auf die Chargenzuordnung gelegt. D.h. es wurden die Frischbetonkennwerte und –bewertungen durch das Personal einer Charge anhand der Lieferscheinnummer und des Zeitstempels eindeutig zugeordnet. Wie in Abbildung 8-15 gezeigt erfolgt die Zuordnung über ein Dropdown Menü der zuletzt produzierten Chargen. Damit auch eine Zuordnung am Fertiger geschehen kann wird zusätzlich noch die LKW-Kennung notiert.

Charge	26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3	~
		4
Zeitstempel	26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3	
	26.11.2020 14:33:32 [GA930609-1-82877-100008253] 612121 2.0m3	
	26.11.2020 14:33:32 [GA930609-2-82878-100008253] 612121 2.0m3	
Probekörper	26.11.2020 13:24:16 [GA930609-2-82876-100008252] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-82874-100008252] 612121 2.5m3	
Lufttemperatur	26.11.2020 13:23:32 [GA930609-1-82875-100008252] 612121 2.5m3	
cartternperatur	26.11.2020 12:11:07 [GA930609-1-82873-100008251] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-82872-100008251] 612121 2.5m3	
Betontemperatur	26.11.2020 12:10:30 [GA930609-1-82871-100008251] 612121 2.5m3	
	26 11 2020 11:25:43 [GA930609-2-82870-100008250] 612121 2 5m3	
Konsistenz	26 11 2020 11:24:58 [GA930609-2-82868-100008250] 612121 2 5m3	
KOH313CCH2	26 11 2020 11:24:58 [GAQ30609_1-82980-100008250] 612121 2 5m3	
	26.11.2020 11:02:47 [GA930609-1-82867-100008240] 612121 2.5m3	
Prüfmethode	26.11.2020 11:02:11 [GAD20600 -1:0207-10000240] 612121 25:01	
	20.11.2020 11.02.11 [GA930009-2-02000 100000249] 012121 2.3115	
Luftnorongohalt	2011.2020 11.02.10 [GR3500091-02203-10000249] 012[21-2,3]	
Charge 26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3 Zeitstempel 26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3 Probekörper 26.11.2020 14:33:32 [GA930609-2-8287+100008253] 612121 2.0m3 Probekörper 26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-8287+100008253] 612121 2.0m3 Luftemperatur 26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-8287+100008253] 612121 2.5m3 Betontemperatur 26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-8287+100008252] 612121 2.5m3 Betontemperatur 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-8287+100008251] 612121 2.5m3 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-8287-100008251] 612121 2.5m3 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-8287-100008251] 612121 2.5m3 Prüfmethode 26.11.2020 11:24:8 [GA930609-2-8287-100008250] 612121 2.5m3 26.11.2020 11:24:8 [GA930609-2-8286-100008250] 612121 2.5m3 Luftporengehalt 26.11.2020 11:24:8 [GA930609-2-8286-100008250] 612121 2.5m3 26.11.2020 11:24:8 [GA930609-2-8286-100008249] 612121 2.5m3 Luftporengehalt 26.11.2020 11:24:8 [GA930609-2-8286-100008249] 612121 2.5m3 26.11.2020 01:10:211 [GA930609-2-8286-100008249] 612121 2.5m3 Rohdichte 26.11.2020 01:13:2 [GA930609-1-8286-100008249] 612121 2.5m3 26.11.2020 00:17:32 [GA930609-2-8286-100008249] 61212 1.25m3	20.11.2020 09:18:10 [GA930009-2-82804-100008248] 012121 2.5m3	
	26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82879-100008253] 612121 2.0m3 ▲ 26.11.2020 14:34:05 [GA930609-1-82877-100008253] 612121 2.0m3 ▲ 26.11.2020 14:33:32 [GA930609-2-82878-100008253] 612121 2.0m3 ▲ 26.11.2020 14:33:32 [GA930609-2-82878-100008253] 612121 2.0m3 ▲ 26.11.2020 13:23:16 [GA930609-2-82878-100008252] 612121 2.0m3 ▲ 26.11.2020 13:23:2 [GA930609-2-82876-100008252] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 13:23:2 [GA930609-2-82876-100008252] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 13:23:32 [GA930609-2-82877-100008251] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-82877-100008251] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-82870-100008250] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 12:10:31 [GA930609-2-82866-100008250] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 11:24:458 [GA930609-2-82866-100008250] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 11:24:47 [GA930609-1-82867-100008249] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 11:24:47 [GA930609-1-82867-100008249] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 11:24:47 [GA930609-2-82866-100008249] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 11:24:16 [GA930609-2-82866-100008249] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 09:17:32 [GA930609-1-82867-100008248] 612121 2.5m3 ▲ 26.11.2020 09:17:32 [GA930609-1-82	
Rohdichte	26.11.2020 09:17:31 [GA930609-2-82862-100008248] 612121 2.5m3	
	26.11.2020 08:12:29 [GA930609-1-82861-100008247] 612121 2.0m3	-

Abbildung 8-15: Dropdown zur Chargenzuordnung

Weitere Informationen zu der Datenschnittstelle und der manuellen Chargenzuordnung können aus den Abschnitten 7.3.3.2 und 7.3.4.3 entnommen werden

8.1.2.1.2.3 Übersicht Betonherstellung in der BF4.0 WebApp

Die Kommunikation und Dokumentation auf der Baustelle konnte durch die BF4.0 WebApp verbessert werden. Es können wichtige Informationen durch alle Prozessbeteiligten in Echtzeit eingesehen und interpretiert werden. So konnten während des Betriebs auf der Baustelle folgende Entwicklungen beobachtet werden.



Abbildung 8-16: Chargenzuordnung der Frischbetonprotokolle in der BF4.0 WebApp.

Die chargentreue Zuordnung der Beprobung und Beobachtungen des Baustoffprüfers ermöglicht anhand der digitalen Lieferscheininformationen das Nachvollziehen der Produktionsinformationen. Über die WebApp Chargen ID kann auf der Übersichtsseite zu den Frischbetonprotokollen und -beobachtungen der digitale Lieferschein abgerufen werden. Hier werden alle relevanten Informationen zu der Produktion dargestellt. Das Vorgehen ist für den Demonstrationstag an einer Charge gekürzt in Abbildung 8-16 dargestellt. Bei den Lieferscheinen wurden neben den Kennungen und Einwaagen auch in einem Spinnendiagramm die prozentualen Abweichungen zu den Rezeptwerten dargestellt. Somit ist es zu erwarten, dass eine Mindereinwaage des Wassers und Mehreinwaage der Gesteinsfraktionen durch die Wasserkorrektur dargestellt wird.

Umgeschlagene Materialien vom 16.11.2020

Hier sind die umgeschlagenen Trockenmassen aufgelistet. D.h. es wurden aus allen Materialien der in der Mischanlage eingestellte Feuchtewert abgezogen. Das Feuchtewasser wird nicht auf das Frischwasser aufgeschlagen. Das heißt, dass das gewogene Wasser kleiner als der durch das Rezept geplante Wert ist.

	631121	612121	gesamt (Rezept)	gesamt (gewogen)
0/4	616.8	223.1	841.8	839.8
16/22	748.3	0.0	748.5	748.3
2/8	318.2	0.0	315.1	318.2
5/8	0.0	559.3	559.5	559.3
8/16	617.6	0.0	617.6	617.6
CEM1 42,5	395.2	180.6	575.6	575.8
LP	3.4	1.4	4.8	4.8
VZ	0.0	0.0	0.0	0.0
W2	127.4	61.1	250.0	188.6

*Alle Mengenangaben sind in Tonnen.

Abbildung 8-17: Umgeschlagene Materialien für den Demonstrationstag aus der BF4.0 WebApp.

Für die Ablaufplanung der Baustelle sind die umgeschlagenen Ausgangsstoffe eine wichtige Information. Diese wurden in der BF4.0 WebApp tageweise und gesamt aufgeschlüsselt in einer Tabelle dargestellt. Dabei wurde zusätzlich die summarischen Einwaagen nach Rezeptnummer getrennt und gesamt dargestellt. Um direkte Abweichungen zur Planung zu identifizieren, werden die aus dem Rezept geplanten summarischen Einwaagen dargestellt. Dazu wurden die Trockenmassen auf Basis der Feuchtemessung bzw. -einstellung der Mischanlage berechnet. Ein Screenshot der umgeschlagenen Materialien am Demonstrationstag ist in Abbildung 8-17 gezeigt.



Abbildung 8-18: Kennzahlen und Produktionsleistung aus der BF4.0 WebApp.



Abbildung 8-19: Kennzahlen und Produktionsleistung aus der BF 4.0 WebApp

Parallel zur BF 4.0 WebApp wurde zur Validierung die Software-Lösung von BPO verwendet.

Für das Einbauteam am Fertiger ist die aktuelle Betonproduktion eine wichtige Information um die Einbauparameter einzustellen. Es haben sich im praktischen Einsatz gezeigt, dass die mittlere Stundenleistung über die letzte Stunde interessant für die Wahl der aktuellen Fertigergeschwindigkeit ist. Weiter konnten über das Diagramm Betonvolumen über Zeit Störungen im Betrieb der Mischanlage identifiziert werden und entsprechend zu reagieren. Der zugehörige Ausschnitt in der BF4.0 WebApp ist in Abbildung 8-18 dargestellt und wird während des Betriebs auf der Baustelle in Echtzeit aktualisiert.



Abbildung 8-20: Produktionshistorie der Betonherstellung aus der BF4.0 WebApp.

Die aktuelle Tagesleistung konnte über die Produktionshistorie direkt gegen die vergangenen Tagesleistungen verglichen werden. Auf diese Weise konnten Schwankungen und Unregelmäßigkeiten direkt identifiziert werden und zeitnah mögliche Ursachen analysiert werden. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 8-20 dargestellt.

Diese Aufstellung ist nicht vollständig, da sich ein vielfältiger Einsatz auf der Demonstrationsbaustelle entwickelt hat und sich das Personal tiefer mit der Thematik beschäftigt hat. Eine genauere Aufstellung aller Themen steht nicht im Fokus des Berichtes.

8.1.2.2 Zweite Demonstrationsbaustelle: A61 Boppard-Waldesch

8.1.2.2.1 Potential Drehzahlanhebung Schnorpfeil

Die in dem vorliegenden Kapitel beschriebenen Maßnahmen beziehen sich auf den Umbau einer im Feld befindenden Mischanlage des Typs Mobilmix 2,5. Hierbei wird der Antriebsstrang eines Liebherr Doppellwellenmischers mit Planetengetriebe auf ein Getriebe der Firma Cavex umgebaut. Bei dem neu verbauten Getriebe handelt es sich um einen Hybrid aus Planeten/Schneckengetriebe.

Ziel ist es, die in Kapitel 3.2.2 gewonnenen Erkenntnisse im Realmaßstab zu validieren. Zusätzlich soll die Praxistauglichkeit des beschriebenen Getriebetyps untersucht werden. Besonderer Fokus liegt bei den durchzuführenden Messungen auf Temperatur-, Geräuschentwicklung und mechanische Beständigkeit. Etwaige konstruktive Schwachstellen, die im zeitlich begrenzten Vorversuch nicht aufgekommen sind, sollen ausgeschlossen werden.

Die ausgewählte Anlage der Firma Schnorpfeil bietet hierfür ideale Voraussetzungen. Durch eine dauerhaft hohe Ausstoßleistung und einem kontinuierlichen Chargenbetrieb, entstehen für das Mischsystem hohe mechanische Beanspruchungen. Zusätzlich werden für einen Doppellwellenmischer vergleichsweise anspruchsvolle Betonsorten mit einer Festigkeit von C30/37 gemischt.

Die für den Realbetrieb verwendeten verfahrenstechnischen Einstellungen können aus den in Kapitel 3.2.2 durchgeführten Versuchen abgeleitet werden. Allerdings sind die gewonnenen Ergebnisse erfahrungsgemäß nicht direkt auf den Realbetrieb anwendbar, sodass Anpassungen durchgeführt werden müssen.

Um die für die rheologischen Untersuchungen benötigten Drehzahlerhöhungen einzustellen, werden Ergebnisse aus vorherigen Untersuchungen skaliert. Es gilt eine Abschätzung der Mischzeiten und des Verschleißverhaltens zu treffen. Die erste Spalte der Tabelle 1 enthalten Prozessgrößen, die aus Messungen der Baustelle Wittlich Salmtal stammen. Aufgeführt ist die gemischte Betonsorte, Chargenzeit, die jeweilig verwendete Drehzahl und die daraus resultierende Motorauslastung.

Unter der vereinfachenden Annahme, dass bei einer Drehzahlvariation ein linearer Zusammenhang besteht, können Prozessgrößen abgeschätzt werden. Es ist ersichtlich, dass bei einer Drehzahl von 20 rpm eine Mischzeit von 60 s vorliegt. Hierbei liegt die Auslastung des Motors bei 67 % der installierten Nennleistung. In den angrenzenden Spalten sind die skalierten Größen für Drehzahlen von 24 und 30 rpm aufgelistet. Bei einer Drehzahlerhöhung auf 30 Umdrehungen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Mischzeit auf 45 s reduziert. Daraus folgend erhöht sich die Ausstoßleistung der Mischanlage von 189 m3/h auf 242 m3/h.

Bei einer dauerhaft erhöhten Drehzahl ist jedoch die thermisch/mechanische Auslastung des Motors zu betrachten. Diese steigt auf 95 % an.

Um einen in der mechanischen Konstruktion üblichen Sicherheitsfaktor einzuhalten, wird eine Drehzahl von 28 rpm definiert. Hier ist davon auszugehen, dass keine thermische Überbelastung des Motors auftritt. Trotzdem ist die Steigerung groß genug, um einen deutlichen Einfluss auf den Mischprozess erwarten zu können.

Tabelle 8.1: : Abschätzung der verfahrenstechnisch	/mechanischen Parameter bei Drehzahlerhöhung
--	--

	_			
			Mischzeitanpassung	Entleerzeit
			bei 10%	bei erhöter
		Standard	Drehzahlerhöung	Drehzahl
Batchgröße	m³/B	2,50	2,50	2,50
Betonbezeichnung		Oberbeton	Oberbeton	Oberbeton
Betonsorte		C30/37	C30/37	C30/37
Konsistenz		F2	F2	F2
		ist	V01	V02
Zwischenhalt beschicker bis Entleer	s	3	3	3
Beschicken	s	15	15	15
Mischen	s	60	45	45
Entleeren	s	17	17	11
Taktzeit	s/B	95	80	74
Drehzahl	rpm	20	24	30
Umdrehungen	r	32	32	37
Verschleißerhöhung		0%	0%	17%
Chargen	B/h	38	45	48
Durchsatzleistung	m³/h	95	113	121
Leistungssteigerung		0%	19%	28%
Anzahl Mischer		2	2	2
Durchsatzleistung ges.	m³/h	189	225	242
mittlere WL ges.	kW	50	58	72
Leerlauf WL	kW	7	7	7
Faktor Drehzahl		1,0	1,2	1,5
Mittlere WL-Mischen	kW	43	51	65
Installierte Leistung	kW	75	75	75
Auslastung Motor		67%	77%	95%

8.1.2.2.2 Integration der CAVEX Getriebe in die Mischanlage von Schnorpfeil

Die Integration des CAVEX Getriebes in die reale Mischanlage stellte eine große Herausforderung dar. Aus den Versuchen im Liebherr-Technikum (Kapitel 6.1.6.1) ergab sich für das CAVEX Getriebe die Notwendigkeit neben dem Getriebe Austausch auch eine zusätzliche aktive Ölkühlung in das System zu integrieren. Diese ermöglicht den Dauerbetrieb des Getriebes innerhalb realer Lastsituationen. Des Weiteren machte das Cavex Getriebe die Verwendung einer separaten Hydraulik für die Klappenansteuerung des Mischers notwendig. Im Falle des "alten" Getriebes wird diese über einen zusätzlichen Abgang des Getriebes bereitgestellt. Die separate Hydraulik erlaub den Betrieb der Klappen unabhängig vom Mischerantrieb und bietet damit dem Kunden zusätzliche Vorteile bei Reinigung und Entleerung des Mischers.

Aus den Erkenntnissen bei der Erprobung im Großtechnikum zeigte sich, dass ein Ölkühler für einen Dauerbetrieb notwendig ist. Hierzu wurde ein Standard Ölkühler mit integriertem Lüfter und einer max. Kühlleistung von 14 kW von der LMT implementiert. In Abbildung 8-21 rechts ist der abgeschlossene Einbau bei der Firma Schnorpfeil zusehen. In der konstruktiven Auslegung ist auch zu beachten, dass die Anlage bei einem Standortwechsel eingeklappt wird und die Konstruktion innerhalb der Klappkurve sich befinden muss, um eine Kollision zu vermeiden trotz engen Bauraumverhältnissen.



Abbildung 8-21: Konstruktion Antriebseinheit, Einbausituation in der Anlage

Die Integration des Getriebes wurde an der Anlage GAxx10 der Fa. Schnorpfeil durchgeführt, sieheAbbildung 8-21. Aus logistischen Gründen fand der Umbau vor dem Umzug der Anlage statt. Aufgrund der sehr engen Bausituation der MobilMix Anlage kam es zu Kollisionen mit der neuen Störkontur des Motors, der innerhalb der neuen Konstruktion höher baut. Somit musste Motor und Antriebsriemen für den Umzug demontiert und am neuen Standort neu eingebaut werden. Im Nachgang der Baustelle wurde hier durch angepasste Konstruktionen des Getriebe Einbaus eine Lösung unter Berücksichtigung der Klappkurve durchgeführt, siehe Abbildung 8-22, welche im Nachgang an das Projekt bei den Anlagen Gaxx09 und GAxx10 umgesetzt wird.

Für den zweiten Umbau der Mischanlage bei der Firma Schnorpfeil wurde mit Cavex ein Lüfterrad zwischen der Gleichlaufgelenkwelle und Abtriebswelle vorgesehen, um eine erhöhte Getriebetemperatur entgegenzuwirken.

Der Umbau des Antriebsstrangs der Mischanlage wurde ebenfalls in enger Abstimmung mit den Firmen Liebherr und CAVEX vorbereitet. Beide Unternehmen beteiligten sich auch bei der Installation und der Inbetriebnahme.



Abbildung 8-22: Anpassung der Konstruktion an Klappkurve

Um die Funktion des Getriebes innerhalb der Anlage zu untersuchen und die mechanische Stabilität des Getriebes zu untersuchen wurden nach dem Einbau an der Demonstratorbaustelle die Bewegung des Getriebes gemessen. Diese lag im Bereich <1.5mm und damit innerhalb der vorgesehenen Toleranzen. Um die Dauerfestigkeit und die Wirkung der aktiven Ölkühlung zu untersuchen wird in Kapitel 8.1.2.2.3 die Temperatur des Getriebes in unterschiedlichen Betriebssitutation untersucht.

8.1.2.2.3 Analyse des Temperaturverlaufs des CAVEX Getriebes auf dem 2. Demonstrator

Um im Vorfeld der Demonstratorbaustelle die Funktion des Getriebes zu untersuchen und die Dauerfestigkeit des Antriebsstranges unter realen Lasten zu evaluieren wurde im Vorfeld der Demonstratorbaustelle durch den LMT Versuch und die zuständige Konstruktion der Temperaturverlauf des Getriebes gemessen. Die Drehzahl des Getriebes liegt bei 28U/min.

Um dies zu tun wurden zusätzliche Temperatursensoren am Getriebe angebracht und gemessen. Die Last wurde durch 4.5t Sand 0/4 im Mischer simuliert. In Abbildung 8-23 ist der Temperaturverlauf über die Untersuchung dargestellt. Zu Beginn des Versuches wurde der Mischer in leerem Zustand bis zur Einstellung des Temperaturgleichgewichtes betrieben. Es ergab sich nach 45min eine Temperatur von 30°C am linke und 35°C am rechten Getriebe. Die Leerleistung des Mischers beträgt ~8kW. In Abbildung 8-23 ist gut zu sehen, wie im Folgenden die Mischerleistung bei Zugabe von Sand in den Mischer erhöht. Bei vollständig gefülltem Mischer (4.5t Sand 0/4) ergibt sich hier eine Spitzenleistung von ~90KW, welche, um reale Leistungen zu erreichen, auf 75KW abgesenkt wurde. Der darauffolgende Temperaturanstieg der beiden Getriebe ist in Abbildung 8-24 im Zeitbereich zwischen 14:45 und 15:50 zu erkennen. Die Temperatur der beiden Getriebe steigt asymptotisch an und kann in der Sättigung mit kleiner 50° angegeben werden. Somit bewegt sich die Temperatur des Getriebes im unproblematischen und zulässigen Bereich. Nach der Entleerung fällt die Temperatur schnell ab und würde wiederum mit einer Zeitkonstante von ~45min die stationäre Leertemperatur erreichen.

In einem zweiten Versuch wurde um 15:53 eine der Originalmischung ähnliche Mischung unterschiedlicher Gesteinssorten zugegeben und dem Gemisch Wasser zu gesetzt.

Zu erkennen ist der Abfall der notwendigen Mischerleistung mit der Zunahme der Durchmischung und der Zunahme von Feinteilen im Gemisch aufgrund des Abriebs innerhalb des Gemisches während der Mischzeit. Da kein signifikanter Temperaturanstieg erkennbar war wurde um 16:12 die Zirkulationspumpe der aktiven Ölkühlung deaktiviert. Ab diesem Zeitpunkt wurde das Getriebe nur noch über die Ventilatoren der Ölkühlung aktive gekühlt. Zu erkennen ist im Folgenden ein asymptotischer Anstieg der Getriebe Temperaturen, dessen stationärer Wert mit ~60°C angegeben werden kann. Ein Schließen der Türe zur Mischerbühne, und damit verbunden eine Reduktion des Luftaustausches, führt zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur auf stationär ~65°C. Als letzter Versuch wurden auch die Lüfter deaktiviert. Nun ist ein nahezu linearer Anstieg der Temperatur zu erkennen, welcher kein asymptotisches Verhalten aufweist, dies deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.1.6.1. Der Versuch wurde bei Erreichen von 70° im rechten Getriebe abgebrochen. Nachdem die Ölkühlung wieder aktiviert wurde, sinkt die Temperatur erwartungsgemäß wieder stark ab und geht gegen den stationären Punkt der Leermischung. Der Anstieg der Mischerleistung über den Prozess nach 16:30 ist durch die Verdunstung von Wasser innerhalb der Mischung aufgrund der langen Mischdauer und der eingebrachten Mischleistung zu erklären.



Abbildung 8-23: Gemessene Temperaturverläufe und Leistungen während der Untersuchung.

Das Ergebnis der Untersuchungen legt die Vermutung nach das eine reine Luftkühlung ohne aktive Ölkühlung für den Betrieb der Getriebe ausreichend ist, da die stationären Temperaturen im Dauerbetrieb in diesem Szenario < 75°C bleiben. Aus diesem Grund wurde durch die Fa. Schnorpfeil im Verlauf der Baustelle die Temperatur der Getriebe im realen Betrieb mit und ohne aktive Ölkühlung getestet. In Abbildung 8-24 sind die Temperaturverläufe für zwei Tage mit hohem Produktionsvolumen dargestellt. Zu sehen ist das die Temperatur mit aktiver Ölkühlung (links) bei ~35°C, ohne aktive Kühlung (rechts) steigt die Temperatur auf etwa 50°C. Der Unterschied zum Dauerversuch mit ~70°C ergibt sich aus dem im real Betrieb vorhandenen Entleerzeiten und Standzeiten des Getriebes.



Abbildung 8-24: Temperaturverlauf des CAVEX Getriebes während der Produktion von Schnorpfeil auf dem zweiten Demonstrator (links mit aktiver Ölkühlung, rechts ohne aktive Ölkühlung).

8.1.2.2.4 Analyse der Mischleistung auf dem 2. Demonstrator

Um die Mischleistung und Getriebetemperaturen weiter zu analysieren wurde die Sensorik der Baustellenmesskampagnen auch für die finale Demonstratorstrecke verbaut. So liegen die Daten für Mischerleistung, Getriebetemperaturen und Dosierzeitpunkte auch für den finalen Demonstrator vor und können mit den Daten der erweiterten Messpampagnen verglichen werden. In Abbildung 8-25 ist die Tagesleistung über einen gesamten Tag exemplarisch dargestellt. Die Anlage hat am 21.7.2021 nahezu kontinuierlich produziert. Kürzere Unterbrechungen finden nur mittags statt. Die stationäre Temperatur der Getriebe lag bei ~35°C, was den Ergebnissen aus Kapitel 8.1.2.2.3 und damit den Erwartungen entspricht. Die Gesamt-Peak-Leistung der Anlage beträgt 140kW, die Peak-Leistung des Mischers liegt bei 110kW, dies übersteigt die Nennleistung des Antriebs kurzzeitig (während der Befüllung), die mittlere Antriebsleistung des Mischers liegt bei 75kW und lieg damit im Grenzbereich der Motorauslegung.

In Abbildung 8-26 sind vier konsekutive Mischprozesse einer LKW Befüllung dargestellt. Gut zu erkennen ist die Peakleistung der gefilterten Antriebsleistung von knapp unter 100kW. Ebenfalls lassen sich die vier Mischungen gut erkennen. Die Zyklus Zeit für eine Charge liegt bei etwa 1min 45 s, die Austoßleistung der Anlage somit bei 85qm. Die Mischzeit liegt bei ~45 Sekunden und damit deutlich unter den 55 Sekunden, die bei regulärer Drehzahl für den Mischprozess vorgesehen waren. Die Anlagenleistung konnte somit von 78qm/h auf 85qm/h um ~10% gesteigert werden, dies bestätigt die Annahmen aus Kapitel 8.1.2.2.1.



Abbildung 8-25: Mischerleistung für die Mischanlage am 21.07.2021



Abbildung 8-26: Ausschnitt für einzelne Mischprozesse am 21.7.2021

Die neuen Getriebe und die erhöhte Drehzahl stießen bei der Fa. Schnorpfeil auf eine positive Resonanz. Die erhöhte Leistung der Mischanlage kann realisiert werden zusätzlich bietet das neue Getriebe einen sehr ruhigen Lauf des Antriebsstranges. Die Fa. Liebherr wird daher die zweite Mischanlage auf den gleichen Stand umbauen, um im Nachgang an das Projekt weitere Ergebnisse in Bezug auf die CAVEX Getriebe und deren Alltagstauglichkeit zu erhalten, womit diese zukünftig als alternativ Getriebe eingesetzt werden können.

8.1.3 D1.3 - Ergänzende Ausstattung des Gleitschalungsfertigers mit erweiterter Messtechnik

Die erweiterte Messtechnik, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurde, besteht aus den folgenden Hardware-Komponenten.

- 1. Laserscanner, angebracht am Gleitschalungsfertiger (vgl. Abbildung 8-27)
- 2. GPS-Empfänger zur Bestimmung der geographischen Position (vgl. Abbildung 8-28)
- 3. TCU (Telematic Control Unit) als Plattform für die Anwendung (vgl.Abbildung 8-29)
- 4. Maschinendisplay als Anzeige der Prozessdaten und für Bedienereingaben (vgl. Abbildung 8-30Abbildung 8-30)
- 5. Wetterstation zur Dokumentation der Umwelt (vgl. Abbildung 8-31)
- 6. Temperaturscanner zur Temperaturüberwachung des eingebauten Frischbetons (vgl.Abbildung 8-32)


Abbildung 8-27 Laserscanner



Abbildung 8-28 GPS Empfänger



Abbildung 8-29 Telematikeinheit



Abbildung 8-30 Maschinendisplay



Abbildung 8-31 Wetterstation & Temperaturkamera

Für die unterschiedlichen Hardware-Elemente mussten im Rahmen des Projektes zunächst mechanische Schnittstellen entwickelt werden. Zwar gab es für den Laserscanner bereits einen einfachen Halter, dieser musste aber aufgrund der deutlich größeren Dimension des Fertigers vollständig neu konstruiert werden.

8.1.3.1 Erste Demonstrationsbaustelle: A1 Wittlich-Hasborn

8.1.3.1.1 Integration des laserbasiertem Ebenheitsmesssytem am Fertiger

Am Technikum Aachen wurde bei den Betoneinbauten auf eine einfache Werkstattlösung für die Anbindung des Laserscanners an den Gleitschalungsfertiger zurückgegriffen. Da die Dimensionen der Demonstratormaschine deutlich größer ausfällt, ist es für diesen Fertiger nötig eine professionell ausgearbeitete Halterung vorzusehen.



Abbildung 8-32: Scanneranbindung am Fahrwerk des Gleitschalungsfertigers

Natürlich darf die Anbindung keinerlei Maschinenfunktionen und –personal behindern. Aus diesem Grund wurde eine Fachwerkkonstruktion entwickelt, die am hinteren linken Fahrwerk angebracht wird. Abbildung 8-32 zeigt die Konstruktion.

Die Baugruppe wird an der oberen Fahrwerkkonsole montiert. Durch die Konstruktion lässt sich das Fachwerk um die Fahrwerkssäule rotieren. Mit Hilfe einer Querstange kann die Aufhängung dann fixiert werden.

Der Scanner selbst wird an einer Grundplatte mittels Schrauben fixiert. Diese Grundplatte kann durch die Befestigung durch Klemmen sowohl in der Höhe als auch im Winkel verstellt werden.

Des Weiteren wurde eine Abschattung konstruiert, sodass der Scanner nicht der großen Umgebungshelligkeit ausgesetzt ist. Bereits in Aachen wurde festgestellt, dass der Scanner bei großen Helligkeiten keine validen Ergebnisse liefert.

Abbildung 8-333 zeigt die reale Konstruktion, angebracht an der linken, hinteren Fahrwerkskonsole des Gleitschalungsfertigers SP94i der Fa. Schnorpfeil während des Bauvorhabens A1 Wittlich-Hasborn.



Abbildung 8-33: Ebenheitsmessung am Oberbetonfertiger

Der GPS-Empfänger wurde am Dach des Fertigers befestigt, das Bedienterminal wurde am Geländer des Bedienstandes in unmittelbarer Nähe zum Operator angebracht. Die Wetterstation wurde auf der Motorstation in einer Höhe von ca. 3,5 Metern installiert, sodass der Sensor nicht abgeschattet wird und valide Messdaten liefern konnte. Die Temperaturkamera wurde so ausgerichtet, dass sie die Temperatur des Frischbetons ungehindert erfassen konnte.

Das System wurde so entwickelt, dass es möglichst autark ohne Zutun des Bedieners arbeitet. Am Display kann live der Fortschritt des Einbaus nachvollzogen werden. Hierzu werden Strecke, Fläche und Volumen (errechnet mit einer Nennstärke des Einbaus).

Weiterhin hat der Operator die Möglichkeit die Einbauqualität zu bewerten (gut / mittel / schlecht) sowie die angezeigten Daten am Tagesende per Knopfdruck zu nullen.

Während bei der ersten Demonstrationsbaustelle zwei Gleitschalungsfertiger des Typs SP94i, konnte zeitbedingt auf der zweiten Baustelle in Boppard nur der Unterbeton durch den genannten Fertiger eingebaut werden. Beim Oberbeton musste auf einen Fertiger SP500 der älteren Generation zurückgegriffen werden, der ohne CAN-Bus keine Grundlage für das Ebenheitsmesssystem bietet. Aufgrund dessen wurde im Plenum entschieden, dass die Anwendung auf dem Unterbetonfertiger aufgebaut werden soll.

Da der Unterbetonfertiger beim zweilagigen Einbau die Dübel- und Ankersetzvorgänge übernimmt, konnte die Anwendung die globale Lage der Dübel dokumentieren. Die Abbildung 8-34 zeigt die aufgezeichneten Dübellagen der zweiten Demonstrationsbaustelle



Abbildung 8-34: Globale Dübellage (Offsetkorrigiert)

Die Dübel sollten planmäßig alle 5 Meter im Beton eingebracht werden. Um die tatsächliche Lage zu validieren, wurde der globale Abstand der Dübel in Abbildung 8-35 bestimmt. Mit einem dokumentierten Abstand von 4.99 Metern liegt die Bewehrung über den gesamte Demonstrationstag nahezu perfekt.



Abbildung 8-35: Dübelabstand

Weitere Einzelheiten zum Aufbau der Schnittstelle kann aus Abschnitt 7.3.3.4.1 entnommen werden.

8.1.3.1.2 Das Prozessleitsystem BF4.0 WebApp

Die Integration der Telematikschnittstelle des Fertigers auf der Serverseite wird durch das Prozessleitsystem BF4.0 WebApp realisiert. Der grundlegende Aufbau des Backends wurde in den Abschnitten 7.3.3.1 und 7.3.3.4.2 vorgestellt und die Interaktion mit dem Nutzer, das Frontend, im Abschnitt 7.3.4.3.1 grundlegend vorgestellt. Im Folgenden wird näher auf die baupraktischen Erfahrungen eingegangen.



Abbildung 8-36: Produktionsleistung des Fertigers der BF4.0 WebApp.

Analog zu der Mischanlage ist für den Betrieb auf der Baustelle der Fortschritt die wichtigste Information zur Analyse. Besonders interessant hierbei war die Produktionsleistung des Fertigers. Der zugehörige Screenshot vom Demonstrationstag der BF4.0 WebApp ist in Abbildung 8-36 dargestellt. Da keine Markierung der des Fertigerzustands (Rangieren, Einbauen) in dem Entwurf der Telematik Schnittstelle spezifiziert wurde, konnte dies auch durch die WebApplikation nicht getrennt werden. Dies ist in der Grafik an dem Anstieg zwischen 7:30 und 8:00 zu erkennen. Das Abfallen auf eine Strecke von 0 um 7:49 ist auf die Nullung des Wegezählers durch das Baustellenpersonals zurückzuführen und erfolgte jeden Einbautag. Am Ende der Einbauschicht wurde keine Nullung vor dem Ausfahren des Fertigers durchgeführt. Die waagrechten Abschnitte im Diagramm können als Standzeiten interpretiert werden.



Abbildung 8-37: Einbauhistorie der BF4.0 WebApp.

Auf Basis der Fertiger Fahrstrecke kann über den Maximalwert, da keine weiteren Informationen vorliegen, die Tagesleistung berechnet werden. So konnte die aktuelle Tagesleistung ebenfalls direkt mit den vergangenen Tagen verglichen werden. Durch die fehlende Kennzeichnung oder Nullung am Tagesende entspricht die dargestellte Strecke nicht der tatsächlichen Einbaustrecke, sondern überschätzt diese. Die durch die Bauleitung ermittelten Einbauleistungen sind somit kürzer. In Abbildung 8-37 ist das zugehörige Balkendiagramm gezeigt. Da am 11.11. die Telematik Einheit komplett ausgefallen ist wurde der Einbau nicht erfasst. Am 14.11. und 19.11. ist eine Statusmeldung (Zündung an) des Fertigers eingegangen und wurde nicht durch die BF4.0 WebApp herausgefiltert. Somit werden diese aktuell noch angezeigt.



Abbildung 8-38: Baustellenfortschritt des Fertigers aus der BF4.0 WebApp.

Über die Umrechnung der GPS-Position des Fertigers kann der Baustellenfortschritt für den Demonstrator in der BF4.0 WebApp übersichtlich dargestellt werden. Abbildung 8-38 zeigt diesen Fortschritt. Anhand dieser Information konnten die einzelnen Tagesleistungen mit den zugehörigen Abschnitten in Verbindung gebracht werden. Die Ausreißer in der Kurve am 5.11. und 20.11. sind vermutlich auf GPS Glitches zurückzuführen. Der Telematik Ausfall am 11.11. ist durch eine Ecke in der Kurve sichtbar. Zu Schichtbeginn ist in der Kurve eine kleine Überhöhung sichtbar. Dies wird durch das Rangieren des Fertigers hervorgerufen.



Abbildung 8-39: Übersichtskarte mit Zeitschieber der Fertigerposition aus der BF4.0 WebApp.

Die Abbildung 8-39 zeigt als schwarze Linie den gesamten Verlauf der Fertigerpositionen auf der Baustelle. Über den Zeitschieber kann der zeitliche Verlauf im Detail nachvollzogen werden. Die Lücken in der Kurve sind wieder die besagten Telematik Ausfälle.

Da der Einbau und der erste Nachbearbeitungsschritt Sprühen unmittelbar aufeinander folgen, ist für die Waschbetonherstellung die Fertigerposition zwar sehr wichtig, jedoch wird das Sprühen durch dieselbe Firma betreut. Daher wurde für Analysezwecke zwar die Fertigerposition immer betrachtet, jedoch für die Erprobung

der Echtzeitprozesse lag der Schwerpunkt auf den Informationen innerhalb der Firma, um eine gute Übertragbarkeit in die Baupraxis zu gewährleisten. Daher wurden für den Demonstrator die Einbauinformationen vorwiegend durch das Einbauteam verwertet.

8.1.4 D1.4 - Bau der beiden gewählten Betonfahrbahnen

8.1.4.1 Erste Demonstrationsbaustelle: A1 Wittlich-Hasborn

Der Herstellprozess der ersten Demonstratorstrecke konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Hauptstrecke mit einer Gesamtlänge von 5,4 km wurde in 13 Tagen hergestellt. Insgesamt wurden ca. 17 400 m³ Beton aufgeteilt in ca. 12 700 m³ und 4 650 m³ Unter- bzw. Oberbeton produziert und eingebaut. Die Produktivität der Baumaßnahme konnte im Vergleich zu Projektbeginn (Wittlich I) durch die zahlreichen maschinellen sowie organisatorischen Optimierungen um ca. 50% verbessert werden. Zudem wurde diese Maßnahme erstmals 100% digital begleitet. Aktiv an den Untersuchungen der Maßnahme waren das ISYS und die MPA seitens der Universität Stuttgart, Schnorpfeil und OAT als Bauausführung und Liebherr und Wirtgen auf der Maschinenherstellerseite beteiligt.

In Abbildung 8-400 sind die Tagesleistungen der Baumaßnahme dargestellt. Die offiziellen Strecken, welche durch die Bauleitung ermittelt wurden, sind in Rot dargestellt. Zum Vergleich sind in Grün und Rot die Rekonstruktion der Tagesleistungen auf Basis der Fertigerpositionen und der Sprühprotokolle durch das ISYS gezeigt. Die Tagesleistung des Fertigers sind aufgrund der Telematik Ausfälle an zwei Tagen kürzer als die Werte der Bauleitung. Da die tatsächliche Einbaustrecke in den Fertigerpositionen nicht erkannt werden kann ist die Tagesleistung an den restlichen Tagen länger. Die Strecken aus den Sprühprotokollen passt gut zu den Werten der Bauleitung.



Abbildung 8-40: Vergleich der Einbaustrecken.

Die komplette Technik, welche an den Maschinen eingesetzt wurde, ist zur Zufriedenheit aller Beteiligten implementiert und über den gesamten Baustellenzeitraum (bis auf kleinere Ausnahmen) eingesetzt worden. Es sind jedoch ein paar Unregelmäßigkeiten bei den Vernetzungsschnittstellen aufgefallen, welche zum Teil etwas Nacharbeit benötigen. Beispielsweise ist ein Datenverlust bedingt durch die schlechte Internetabdeckung an der Mischanlage aufgetreten, welcher durch Erweiterungen während der Laufzeit behoben werden konnte. Zum Ende der Maßnahme ist vermutlich bedingt durch eine schlechte Mobilfunkabdeckung der Mischanlage die Schnittstelle öfter ausgefallen. Da ein Neustart ein Risiko für den Produktionsablauf bedeutete musste an manchen Tagen auf die Echtzeitinformation verzichtet werden.

Mit den umfangreichen Maschinenschnittstellen konnten erstmals live und automatisiert Daten von allen Prozessschritten eingeholt und mittels der BF4.0 WebApp direkt dem Baustellenpersonal zur Verfügung gestellt werden. Weiter wurde durch die GPS Logistikschnittstelle per Smartphone App (vgl. Abschnitt 7.3.4.3.3) sowie durch die Telematikdaten der Nachbearbeitungsmaschinen für diese Maßnahme ein vollständiger Datensatz zur Analyse der Prozesskette von der Betonproduktion bis hin zu abschließenden Messungen erhoben, welcher durch die gute Qualität neues Analysepotential eröffnet. Besonders hervorzuheben ist, dass an dieser Maßnahme es erstmals innerhalb des Forschungsvorhabens möglich ist alle notwendigen Daten zur Rückverfolgbarkeitsanalyse aufzuzeichnen und auszuwerten.

Die eingesetzten Digitalisierungsmethoden sind auf der Baustelle auf eine breite Akzeptanz gestoßen. Sie wurden vom Personal vor Ort wie auch im Büro über alle Hierarchiestufen eingesetzt. Im kontinuierlich Dialog zwischen der universitären Entwicklung und der Bauausführung wurden neue Aspekte aufgenommen und teilweise konnten diese direkt erprobt werden. Somit wurde ein direkter Mehrwert für die Informationstransparenz während der Ausführung und der Dokumentation geschaffen.

8.1.4.2 Zweite Demonstrationsbaustelle: A61 Boppard-Waldesch

Die abschließenden Arbeiten für L+P im Verbundprojekt wurden im Kontext der finalen Demonstrator-Baustelle durchgeführt. Die Demonstrator Baustelle befindet sich auf der A61 in Fahrtrichtung Koblenz zwischen den Kilometern 245+000 und 241+250 im Bereich zwischen den Anschlussstellen Boppard und Waldesch. Während die Oberfläche auf dem Fahrstreifen 2 in Asphaltbauweise ausgeführt wird, sind für den Stand- und Hauptfahrsteifen Betonoberflächen vorgesehen. Auf den ersten ca. 3000 m der Demonstrator Baustelle wird durchgehend bewehrter Beton eingebaut. Daran schließt sich ein ca. 30 m langes Brückenbauwerk über die L207 an. Die restlichen ca. 420 m der Demonstrator Baustelle werden in Plattenbauweise ausgeführt. Sowohl die durchgehend bewehrte Betondecke als auch die Decke in Plattenbauweise wurde abschließend einem Textur- und Ebenheitsgrinding unterzogen – teilweise in Kombination mit Grooving. Ein Teilbereich der bewehrten Bauweise, der etwa von Messmeter 2100 – 3100 reicht, wurde nicht mit Grooving nachbehandelt. Insofern eignet sich die Demonstrator-Strecke auch, um zu untersuchen, welchen Einfluss Grinding/Grooving auf die berührungslose Längsebenheitserfassung hat. Das Messsystem S.T.I.E.R ist hierfür ideal, da die Längsebenheit sowohl konventionell mittels HRM-System gemäß TP-Eben (FGSV, 2009) als auch aus einem hochpräzisen Oberflächenmodell erfasst und bewertet werden kann.



Abbildung 8-41: Lage der Demonstrator Baustelle auf der A61 zwischen den Anschlussstellen Boppard und Waldesch. Quelle Basemap: OpenStreetMap Mitwirkende

Im Rahmen der Untersuchungen an der Demonstrator-Baustelle werden die Oberflächen der Asphalttragschicht, die Oberfläche der eingebauten Decke vor Grinding/Grooving und die Oberfläche nach Grinding/Grooving durch das Mobile Messsystem S.T.I.E.R im Zuge von drei Messeinsätzen vermessen und Ebenheitsanalysen durchgeführt.

Messung und Analyse der Unterlage vor Einbau der Betondecke

Bis zur KW25 wurde die Asphalttragschicht fertiggestellt und die Baustelle am 25.06.2021 für die Befahrung seitens der Firma Schnorpfeil beräumt. Die Messung der Tragschicht fand am 26.06.2021 statt. Die Messbedingungen waren aufgrund der Oberflächentrockenheit und der weitgehenden Abwesenheit von Baumaschinen bzw. Baumaterialien gut (siehe Abbildung 8-42).



Abbildung 8-42: Messsystem S.T.I.E.R unmittelbar vor Beginn der Messungen auf der Tragschicht der Demonstrator Baustelle am 26.06.2021.

Insgesamt wurden Messungen für alle späteren Fahrstreifen, die in Betonbauweise ausgeführt werden sollten, durchgeführt (FSO und FS1). Das Niveau der Tragschicht für die Fahrstreifen 0 und 1 lag ca. 20 - 25 cm tiefer als das des FS2. Im Bereich der Demonstrator Baustelle befindet sich etwa bei Kilometer 241+700 ein Brückenbauwerk über die L207, in dessen Umfeld die Tragschicht zum Zeitpunkt der Messung noch nicht durchgehend baulich angebunden war, sodass hier auf einer Länge von ca. 80 Metern keine verwertbaren Daten hinsichtlich Ebenheit erhoben werden konnten (sieheAbbildung 8-43).



Abbildung 8-43: Situation im Umfeld des Brückenbauwerks, welches sich im Messmeterbereich um 3200 m befindet.

Die Längsebenheit wurde, wie auch schon bei allen vorherigen Baustellenanalysen, entlang der Indikatoren PGR_MAX, DBL und SBL analysiert. In Abbildung 8-44 sind die Ebenheitsindikatoren der Unterlage für den Hauptfahr- und Standstreifen dargestellt. Ferner sind zusätzliche Informationen, wie z.B. die Lage von Quernähten und dem Brückenbauwerk visualisiert.



Demonstrator-Baustelle Boppard-Waldesch BAB A61 Tragschicht (FS1)

Abbildung 8-44: Die Kurven zeigen die auf den Zielwert normierten Ebenheitsindikatoren PGR-MAX, DBL und SBL für den Bereich der Tragschicht, in der später der FSO entstehen wird. Zusätzlich sind Einzelereignisse, wie Quernähte und das Brückenbauwerk eingezeichnet (Messung vom 26.06.2021).

Die berechneten Längsebenheitsindikatoren legen eine gute Ebenheit der Tragschichtoberfläche nah. Die Ebenheitsindikatoren in den vorstehenden Graphen sind auf die jeweiligen Zielwerte für Fahrbahndecken (PGR_MAX = 4mm, SBL = 4mm, DBL = 24mm) normiert. Überschreitungen des Wertes 1 beziehen sich also auf einen sehr strengen Bewertungsmaßstab. Während die Wertausprägungen des PGR_MAX für beide untersuchten "Fahrstreifen" im Mittel unterhalb des Zielwertniveaus schwanken, liegt das mittlerer Niveau der Indikatoren des bewerteten Längsprofiles DBL und SBL oberhalb des Zielwertniveaus. Deutliche Überschreitungen der Zielwerte sind hauptsächlich an Stellen zu verzeichnen, an denen die Tragschicht nicht oder nur teilweise vorhanden war, wie z.B. am Anfang und Ende der Baustelle oder im direkten Umfeld des Brückenbauwerks (siehe Abbildung 8-45). Darüber hinaus sind die Peaks bei den Messmetern 1250 und 2250 zu erwähnen (siehe Abbildung 8-45 und 8-46). An diesen Stellen sind Quernähte vorhanden, die von der Fertigung der Tragschicht herrühren.



Abbildung 8-45: Quernaht in der Tragschicht, welche den Peak in den Signalen der Ebenheitsindikatoren bei Messmeter 1250 erzeugt.



Abbildung 8-46: Quernaht in der Tragschicht, welche den Peak in den Signalen der Ebenheitsindikatoren bei Messmeter 2290 erzeugt.

Eine Stufenbildung ist im Umfeld dieser Nähte nur bedingt festzustellen, jedoch existieren lokale Erhebungen (Buckel), die wie in Abbildung 8-45 dargestellt, welche die Längsebenheitsindikatoren beeinflussen können. Dies hängt davon ab, ob das Längsprofil die räumlich sehr begrenzt auftretende Oberflächenvariation schneidet oder nicht. Das dargestellte Beispiel soll daher verdeutlichen, warum Peaks in den Signalen der Ebenheitsindikatoren an manchen Stellen ungleich stark ausgeprägt sind. In Abbildung 8-47 resultiert der Peak nicht aus einer etwaigen Stufe an der Quernaht, sondern aus einer lokalen Erhebung (Buckel), die im Querprofil entlang der Naht ungleichmäßig ausgeprägt ist. Im Beispiel führt das Abweichen von der mittleren Messlinie um 20 cm nach links oder rechts dazu, dass der Buckel entweder getroffen oder verfehlt wird. Die Unebenheit im Bereich der Quernaht bei Messmeter 1250 m tritt beispielsweise nur auf FS1 auf, nicht aber in FS0.



Abbildung 8-47: Schematische Darstellung des Einflusses lokaler Deformationen in Abhängigkeit zur Lage des Höhenlängsprofils. Oben links: perspektivische Ansicht auf eine querlaufende Arbeitsnaht links Intensität als Graustufen kodiert. Oben rechts: dieselbe Situation mit farbkodierter relativer Höhe. Unten: Prinzipdarstellung für Höhenlängsprofile an drei verschiedenen Entnahmepositionen.

Messung und Analyse der Betondecke vor Grinding

Die Aufnahme der fertiggestellten Betondecke fand mit dem Messsystem S.T.I.E.R am 13.08.2021 statt. Der Baustellenbetrieb war zum Zeitpunkt der Messung bereits eingestellt, sodass eine störungsfreie Messung stattfinden konnte. Ein Ausweichen war nur auf dem Standstreifen im Bereich einer Warnbake bei Kilometer 244+300 nötig. Die Witterungsbedingungen für die Messung waren insofern optimal, als dass die Oberfläche trocken war.



Abbildung 8-48: Messsystem S.T.I.E.R unmittelbar vor Beginn der Messungen auf der Betondecke der Demonstrator Baustelle vor Grinding am 18.08.2021.

Die Oberflächensituation war dagegen leider ungünstig für eine berührungslose Ebenheitsmessung, da die zu messende Oberfläche über weite Strecken durch loses Material (Kies, Sand) verunreinigt war. Das Lasermessverfahren kann nicht zwischen der zu messenden Betonoberfläche und sich darauf befindlichen Materialansammlungen unterscheiden. Demzufolge werden Verunreinigungen als Unebenheit der Betonoberfläche interpretiert. Einzelne Steine kleiner Korngröße (<3cm) können mittels Ausreißerfilter entfernt werden. Ist das lose Material jedoch flächenhaft vorhanden, kann die darunter befindliche Betonoberfläche nicht mehr sicher rekonstruiert werden. Bei der Interpretation der Ebenheitsindikatoren ist dies zu berücksichtigen.



Abbildung 8-49: Raue Struktur der Oberfläche im Bereich des Regenfeldes sowie Verunreinigungen der Fahrbahn durch teils große Steine.

Insgesamt bewegen sich die Werte der Ebenheitsindikatoren überwiegend unterhalb des Zielwert-Niveaus, wobei die Werte im FSO im Vergleich zu FS1 leicht erhöht sind. Die Messergebnisse, die in Abbildung 8-50 dargestellt sind, geben im Hinblick auf die Längsebenheit keinen Hinweis auf einen signifikanten Unterschied zwischen dem Abschnitt mit vorherrschender bewehrter Bauweise und Plattenbauweise. Die Graphen zeigen nur lokal begrenzte, punktuelle Überschreitungen (Peaks). Diese festgestellten Überschreitungen der Ebenheitsindikatoren decken sich in der Regel mit Ereignissen, die während des Einbaus dokumentiert und von der Firma Schnorpfeil bereitgestellt wurden. Abbildung 8-51 zeigt die Verformung der Betondecke im Umfeld eines Tagesanschlusses.



Abbildung 8-50: Ergebnisse der Ebenheitsanalyse für die Betondecke vor Grinding (Messung vom 18.08.2021). Die Kurven der Ebenheitsindikatoren sind überlagert dargestellt mit Informationen, die Seitens der Firma Schnorpfeil bereitgestellt wurden (Tagesnähte, Fertigerstops).



Abbildung 8-51: Unebenheit infolge eines Buckels, der sich an der tagesnaht im FSO an Messmeter 220 ausgebildet hat. In der Intensitätsinformation (links) ist ein sanierter Kantenschaden als schwarzes Rechteck entlang der Querscheinfuge zu sehen.

Messung und Analyse der Betondecke nach Grinding

Die Aufnahme der finalen Betondecke nach erfolgtem Grinding fand am 01.10.2021 statt. Zuvor wurde bereits am 29.09.2021 und am 30.09.2021 versucht, die Strecke zu messen. Aufgrund von starker Nässe mussten die Messungen jedoch abgebrochen bzw. verworfen werden.



Abbildung 8-52: Messfahrzeug S.T.I.E.R vor Beginn der Messungen am 01.10.2021

Eine zentrale Fragestellung, die im Zuge der Ebenheitsevaluation der finalen Demonstratoroberfläche zu klären war, bezog sich darauf, ob Grinding- bzw. Groovingoberflächen mit konventioneller Sensorik (HRM-Prinzip) gemessen und bewertet werden können. Es wurde erwartet, dass die berührungslose Ebenheitsmessung auf gegrindeten Oberflächen nach dem konventionellen HRM-Verfahren nicht funktionieren kann, da das Messprinzip der Mehrfachabtastung ein und desselben Oberflächenpunktes potentiell durch die Strukturierung der Oberfläche in Rillen und Stege verletzt wird. Da das Messfahrzeug S.T.I.E.R sowohl mit einem HRM-Messsystem als auch mit einem 3D-Oberflächen-LiDAR System ausgestattet ist, konnten beide Ansätze direkt verglichen werden. Abbildung 8-52 zeigt das Ergebnis des Vergleichs. Es ist dabei deutlich zu sehen, dass die HRM-basierten Indikatoren in den "Grinding+Grooving"-Bereichen durch ein extremes Rauschen gekennzeichnet sind, wohingegen die 3D-Oberflächenmodell-basierten Indikatoren auf demselben Niveau bleiben, wie im nicht mit Grooving nachbehandelten Fahrbahnabschnitt. Im Bereich von Messmeter 2100 bis 3100, in dem Grinding angewendet wurde, aber kein Grooving, sind die HRM-basierten Indikatoren im Vergleich zu den 3D-Modellbasierten Indikatoren erhöht.



Demonstrator-Baustelle Boppard-Waldesch BAB A61 nach Grinding/Grooving (FS1)

Abbildung 8-53: Vergleich von Ebenheitsindikatoren auf Basis von mit HRM-Verfahren erfassten Höhenlängsprofilen mit auf Basis von aus 3D-Oberflächenmodellen extrahierten Höhenlängsprofilen.

Da die HRM-Messdaten für die Ebenheitsauswertung nicht verwendet werden konnten, wurden eine Analyse rein auf 3D-Modell-basierten Indikatoren realisiert. Die Ebenheitsanalyse lässt, wie in Abbildung 8-53 dargestellt, auf ein im Allgemeinen sehr gutes Ebenheitsniveau folgern. Die meisten punktuellen Unebenheiten, die vor dem Grinding im Bereich von beispielsweise Tagesnähten auftraten, waren nach dem Grinding nicht mehr vorhanden. Der Bereich zwischen Messmeter 2300 und 3000 ist im Vergleich zum Rest der Strecke durch ein leicht erhöhtes Niveau aller Indikatoren charakterisiert, bleibt jedoch weitgehend unterhalb des Zielwertes. Alle sonstigen Peaks sind durch Oberflächenverunreinigungen zu erklären (aufgewirbeltes Laub). Im FSO waren außerdem an einigen Stellen ein Verlassen der Messlinie nötig, da der Messweg durch gelagertes Baumaterial (Schutzplanken) versperrt war. Wie bereits dargelegt, ist in solchen Bereichen keine Aussage über die tatsächliche Ebenheit der Fahrbahnoberfläche möglich.



Demonstrator-Baustelle Boppard-Waldesch BAB A61 nach Grinding/Grooving (FS1)

Abbildung 8-54: Ergebnisse der Ebenheitsanalyse für die Betondecke nach Grinding (Messung vom 01.10.2021). Die Kurven der Ebenheitsindikatoren sind überlagert dargestellt mit ergänzenden Informationen (Bauweise, Verunreinigungen, Umfahrung von Hindernissen).

Auffällig waren im Zuge der visuellen, bild-basierten Detailinspektion die teilweise gravierend erscheinenden Rissbildungen im Bereich der bewehrten Betonbauweise (siehe Abbildung 8-55). Das Auftreten von Rissen war hier jedoch seitens der an der Bauausführung beteiligten Parteien erwartet worden.



Abbildung 8-55: Das Bild zeigt einen Ausschnitt einem Umfeldkamerabild am Messsystem S.T.I.E.R. In den Bereichen, die in bewehrter Bauweise ausgeführt wurden, ist eine dafür charakteristische Querrissbildung festzustellen.

Als Fazit der Untersuchungen an der Demonstrator Baustelle ist seitens L+P folgendes festzuhalten: Ein Einfluss von Unebenheiten der Tragschicht auf Ebenheit der Decke kann nicht nachgewiesen werden. Vielmehr korrelieren Unebenheiten mit Maschinenstopps oder Tages-anschlüssen. Die Ebenheitsmessung mit klassischen berührungslosen Verfahren auf Grinding/Grooving Oberfläche ist nicht zuverlässig möglich, da das HRM-Messprinzip durch die charakteristische Oberflächengestaltung (Stege und Rillen) verletzt ist. Das betrifft vor allem Grooving-Oberflächen. Ebenheitsmessung auf Basis des 3D-Modells dagegen liefert plausible Ergebnisse. Punktuelle Unebenheiten der Decke, wie sie an Tagesnähten vorkamen, konnten durch die Grinding/Grooving-Behandlung eliminiert werden. Darüber hinaus sind die Ebenheitsindikatoren im Allgemeinen nach der Grinding/Grooving-Behandlung auf einem signifikant niedrigeren Niveaus. Die Ebenheit konnte also verbessert werden.

8.1.5 D1.5 - Nachbearbeitung der Fahrbahndecke mittels Bürsten, Schneiden und Grinding

In diesem Arbeitspaket sollen zwei Demonstratoren gebaut werden, bei denen eine möglichst optimale Fahrbahndecke entsteht. Im Bereich der Oberflächennachbearbeitung soll hier auch das Grinding betrachtet werden. Neben dem Zeitpunkt der Ausführung ist auch die Maschinensteuerung im Forschungsvorhaben adressiert. Hier ist insbesondere die Linienführung genannt. Aufgrund der Verzögerungen im Arbeitspaket C und hieraus resultierend freiwerdenden Kapazitäten wurde bei OAT bereits mit der Verbesserung der Maschinentechnik begonnen.

8.1.5.1 Demonstration der Linienführung an unabhängigen Baustellen

Beim Grindingverfahren wird die Oberfläche bahnenweise durch rotierende Diamantscheiben bearbeitet, die auf eine Welle montiert sind. Die Führung der Maschine erfolgte in der Vergangenheit rein manuell durch den Maschinenführer, der über einen Peilstab die vorherige Bahn avisierte und versuchte möglichst parallel dazu und ohne große Überlappungen zu fahren. Die Genauigkeit ist hierbei sehr von den Fähigkeiten und der Konzentration des ausführenden Personals abhängig. Diese Abhängigkeit soll durch technische Hilfsmittel reduziert werden.

In ersten Schritten wurde ein Sensor entwickelt, der dem Maschinenführer unterstützend zur Seite steht, um eine höhere Genauigkeit der Linienführung und somit einer homogenen Oberfläche aufgrund reduzierter Überlappung benachbarter Grindingbahnen zu erreichen. Über eine Anzeige wurde signalisiert, ob und in welche Richtung die Maschine korrigiert werden muss. Dieses System wurde weiterentwickelt, so dass die Sensorik nun direkt in die Maschinensteuerung eingreift und somit Abweichungen von der Solllinien direkt entgegenwirkt. Der Maschinenführer muss somit nur noch überwachende Tätigkeit ausführen. Das System führt zu einer höheren Genauigkeit und somit Qualität des Endprodukts und zu einer Entlastung des Personals.



Abbildung 8-56: In Textur eingelegtes Tastwerkzeug des Sensors

Diese Entwicklung wurden an von den Projektpartnern unabhängigen Baumaßnahmen durchgeführt und erprobt. Grund hierfür ist, dass der Demonstrator im Rahmen vorhandener öffentlicher Aufträge mit vorgegebenen Oberflächentexturen ausgeführt wurde, um die Kosten für das Projekt selbst gering zu halten und die Hauptleistung bezahlt zu bekommen. Nachdem hierbei keine Grindingoberflächen vorgesehen waren, wurde die Technik ebenso im Rahmen tatsächlicher Aufträge eingesetzt, wodurch im Forschungsprojekt lediglich die Kosten für Entwicklung und Testung der Sensorik anfielen und die reinen Baukosten anderweitig gedeckt waren.

8.1.5.2 Erste Demonstrationsbaustelle: A1 Wittlich-Hasborn

Bei den Nachbearbeitungsschritten wurden auf dem ersten Demonstrator Methoden zur digitalen und automatischen Baustellendokumentation gezeigt sowie deren Potentiale aufgezeigt. Hierbei stand neben der digitalen Erfassung des Protokollwesens auch der Echtzeitinformationsaustausch und die Integration der GPS-Positionen aller Maschinen auf der Baustelle im Vordergrund. Mit diesen Daten zusammen mit den Informationen aus den anderen Prozessschritten ist erstmals im Forschungsvorhaben möglich detailliert den Zusammenhang zwischen Betonherstellung oder Einbau und den Bearbeitungszeitpunkten zu untersuchen.

8.1.5.2.1 Telematik Tracker des Nachbearbeitungsfuhrparks



Abbildung 8-57: Telematik Tracker der Nachbearbeitungsmaschinen.

Die automatisierte Erfassung aller Nachbearbeitungsschritte erfolgte mit Telematik Trackern wie sie in Abbildung 7 dargestellt sind. Dazu wurde die Sprühbühne zusätzlich mit einem mobilen Tracker ausgestattet, da sie nicht zum Fuhrpark von OAT gehört. Der Telematik Tracker der Bürste wurde außerdem um die Statusmeldungen *Bürste an/aus* erweitert, damit in den Telematik Meldungen unterschieden werden kann, ob die Maschine am Prozessschritt arbeitet oder andere Aufgaben durchführt (vgl. Abschnitt 6.3.3.5). Da es sich um ein zugekauftes Telematik System handelt, aus welchem die Daten über einen Onlinedienst durch die BF4.0 WebApp abgerufen werden, funktionierte die Schnittstelle sehr zuverlässig.

8.1.5.2.2 Echtzeit Übersicht Nachbearbeitung

Die automatische Dokumentation des zeitlichen Fortschritts ist ein Schwerpunkt des Demonstrators gewesen. Um in Echtzeit schon einen ersten Einblick in den Bearbeitungsfortschritt zu bekommen wurden die GPS Positionen auf die Baustellenstation umgerechnet und in einem Diagramm über die Zeit dargestellt. Diese Darstellung ist in Abbildung 8-39 zu sehen. In Rot ist der Fortschritt der Sprühbühne, in Grün der Bürste und in Blau die Schneidmaschinen dargestellt. Der generelle Fortschritt der Baustelle kann analog zu der gleichen Darstellung wie beim Einbau beurteilt werden. Weiter legt ein paralleler Verlauf der drei Bearbeitungsschritte ähnliche Umgebungsbedingungen nahe. Zu Beginn der Baumaßnahme ist ein herantasten des Schneidens an den optimalen Schnittzeitpunkt zu sehen.



Abbildung 8-58: Echtzeitansicht Baustellenfortschritt der Nachbearbeitung (rot: Sprühbühne, grün: Bürsten, blau: Schneiden)

Durch die schichtweise Darstellung (2-Tage) der Protokolle, können beobachtete Effekte schnell miteinander verglichen werden. Weiter wurde die Kommunikation über den eigenen Arbeitsschritt hinaus auf diese Weise vereinfacht. Die Einsatzplanung des Bürstens und Schneidens konnte auf Basis der Sprüh- bzw. Bürstprotokollen vereinfacht werden. Für den 16.11. und 17.11. sind die Protokolle in Abbildung 8-59 dargestellt.

Sprühen						
Zeitstempel	Station	Tagesfortschritt	Witterung	Lufttemperatur	Bemerkung	
17.11.2020 10:22	098+860	90 m	bewölkt	9.0 ° C	Beton und Sprühende	e 1Lage defekt
17.11.2020 08:27	098+950		bewölkt	8.0 ° C	Sprühbeginn OB stark	ausgebessert
16.11.2020 17:20	098+955	495 m	regnerisch	9.0 ° C	Beton und Sprühende	2
16.11.2020 16:07	099+010	450 m	feucht	9.0 ° C		
16.11.2020 15:15	099+050	410 m	feucht	9.0 ° C		
16.11.2020 14:49	099+100	360 m	regnerisch	9.0 ° C	Anfang der BV	
16.11.2020 14:06	099+140	320 m	regnerisch	9.0 ° C		
16.11.2020 13:02	099+200	260 m	bewölkt	9.0 ° C		
16.11.2020 12:03	099+240	220 m	regnerisch	9.0 ° C		
16.11.2020 11:00	099+300	160 m	bewölkt	9.0 ° C		
16.11.2020 10:00	099+350	110 m	bewölkt	8.0 ° C		
16.11.2020 09:31	099+400	60 m	bewölkt	7.0 ° C		
16.11.2020 08:37	099+460		regnerisch	7.0 ° C	Sprühbeginn	
Bürsten						
Zeitstempel	Station	Witterung	Lufttempera	tur	Texturtiefe	Bemerkung
17.11.2020 06:51	98+950	feucht	8.0° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
17.11.2020 06:46	99+050	feucht	8.0° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
17.11.2020 06:04	99+150	feucht	8.0° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
17.11.2020 06:03	99+250	feucht	8.0° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
17.11.2020 01:27	99+350	feucht	9.0 ° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
17.11.2020 00:55	99+450	feucht	9.0 ° C	0.9 (Sa	ndflächenverfahren)	
Schneiden						

Zeitstempel	Station	Witterung	Lufttemperatur	Bemerkung
17.11.2020 16:49	99+000	bewölkt	8.0 ° C	
17.11.2020 14:33	99+050	bewölkt	7.0 ° C	
17.11.2020 12:49	99+180	bewölkt	9.0 ° C	
17.11.2020 10:56	99+370	bewölkt	10.0 ° C	
17.11.2020 09:25	99+450	bewölkt	12.0 ° C	

Abbildung 8-59: Schichtweise Darstellung der Nachbearbeitungsprotokolle

8.2 ARBEITSPAKET D2 – AUFBEREITUNG UND IDENTIFIZIERUNG VON OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Um die Übertragbarkeit in die Baupraxis sicherzustellen, müssen die Forschungsergebnisse validiert und optimiert werden. Dies ist das Ziel des vorliegenden Arbeitspaketes.

8.2.1 D2.1 - Rückführung der prozessrelevanten Daten im Betrieb zur Validierung und Optimierung des Prozessleitsystems

Bereits am ersten Demonstrator konnten schon einige Verbesserungen durch die Methoden im Forschungsvorhaben verzeichnet werden. Zu den wichtigsten Prozessoptimierungen zählen die Digitalisierung aller Prozesse auf der Baustelle durch die Integration in das Prozessleitsystem BF4.0 WebApp, die kontinuierliche Optimierung der Mischanlage sowie die innovative Ebenheitssensorik am Fertiger.

8.2.1.1 BF4.0 WebApp: 2. Demonstrator

Der zweite Demonstrator fand auf der A61 bei Boppard-Waldetsch zwischen dem 20. Juli und dem 9. August 2021 statt. Der Demonstrationstag, welcher intensiv messtechnisch begleitet und durch die Projektpartner besichtig wurde, fand am letzten Produktionstag statt. Der Verlauf der gesamten Baustelle ist in *Abbildung 8-60* gezeigt. Die Strecke, welche am Demonstrationstag gebaut wurde, ist durch eine Box markiert.



Abbildung 8-60: Standort des 2. Demonstrators.

Die Betreuung der BF4.0 WebApp wurde durch Liebherr für den zweiten Demonstrator A61 Boppard-Waldetsch auf der Serverinfrastruktur des ISYS weitergeführt. Wie in der *Abbildung 8-60* und in der Übersichtskarte in *Abbildung 8-60* gezeigt, wurde die BF4.0 WebApp über den gesamten Baustellenzeitraum eingesetzt. Die Nachbearbeitung wurde nur auf der Demonstrationsstrecke in klassischer Weise durchgeführt, da der Hauptteil der Baustelle in vollbewährter Bauweise mit einer Grinding Oberfläche ausgeführt wurde.

Baustelle: A61 Boppard - Waldesch	ו (2674)				
Allgemeine Informationen					
Zeitraum: 15. Juli 2021 - 16. August 2021					
Einbautage: 15					
Betonherstellung	Einbau	Nachbearbeitung			
Zur Übersicht	Zur Übersicht	Zur Übersicht			
gesamt: 2657 Chargen / 6623.5 m³	2951 Einbaustationen	0 Sprühprotokolle			
731111: 2580 Chargen / 6434.5 m³		0 Bürstprotokolle			
732112: 77 Chargen / 189.0 m ³		0 Schnittprotokolle			
65 Frischbetonbeprobungen					

Abbildung 8-61: Übersichtskarte des zweiten Demonstrators.

Im Folgenden wird die Demonstrationsstrecke am letzten Einbautag näher betrachtet. Insgesamt wurden

- 855m³ bzw. 432 Chargen Beton
- 11 Frischbetonprotokolle an der Mischanlage
- 10 Frischbetonbeurteilungen an der Mischanlage und 9 am Fertiger
- 1653 Fertiger Stationen für den Unterbeton durch die Wirtgen Telematik Schnittstelle
- 806 Fertiger Positionen für den Oberbeton durch den OAT mobiler Tracker

in der BF4.0 WebApp erfasst. Diese Information fand in den Echtzeit Ansichten live auf der Baustelle Anwendung und wurde durch das Personal vor Ort genutzt. Die Echtzeit Ansicht der Betonherstellung ist in Abbildung 5-62 dargestellt. Die Produktion konnte fast durchgängig reibungsfrei ablaufen. Bei ca. 10 und 12 Uhr traten zwei kleinere Unterbrechungen auf, wie sie in der Tagesleistung durch die waagrechten Abschnitte dargestellt werden. An der Produktionshistorie ist ersichtlich, dass der Demonstrationstag die größte Tagesleistung der Baumaßnahme besitzt.



Abbildung 8-62: Echtzeitübersicht der Betonherstellung.

Bei der Erfassung der Frischbetonprotokolle konnte durch eine bessere Internetabdeckung im Vergleich zum ersten Demonstrator besser durchgeführt werden. Dies ist an der Tabelle der Frischbetonprotokolle unter dem Link in der Spalte Chargenprotokolle in *Abbildung 8-62* erkennbar. Die Frischbetonbeurteilung wurde bei dieser Baustelle intensiver durchgeführt. Es wurde über das Bemerkungsfeld der LP Gehalt dokumentiert.

Hierbei wurde durch das Personal vor Ort die Probeentnahme so koordiniert, dass immer derselbe LKW betrachtet wurde und die Chargen kommuniziert. Somit ist die Entwicklung des LP Gehalts über den Transport zur Baustelle dokumentiert und mit den Informationen der digitalen Lieferscheine verlinkt. Jedoch konnte durch die Baustellenbegebenheiten nicht die Entnahme der Probe am Fertiger aus dem LKW erfolgen, sondern wurde vom abgekippten Beton gezogen. Dies bedeutet, dass die eindeutige Zuordnung auf eine LKW Ladung bestehend aus vier Mischanlagen Chargen erfolgt. Diese Verlinkung ist in *Abbildung 8-63* durch die Box hervorgehoben. Hier wurden zwei Beurteilungen markiert, welche derselben Betoncharge zugeordnet sind.

Frischbetonprotokolle					Frischbetonbeurteilung										
Neues Protokoli Filtereinstellungen			+ Neue Beurteilung							🛓 Download					
					Temperatur			Baustelle	Charge	Betonsorte	Zeitstempel	Position	Fahrzeug	Bewertung	Bemerkung
Baustelle	Chargennr.	Betonsorte	Zeitstempel	Probennr.	(Beton/Luft)	Konsi	B,	A61 Boppard -	40507	731111 (2674	09.08.2021	Fertiger		ОК	Lp 3,9
 A61 Boppard Waldesch (2074) 	40507	731111 (2674 Boppard-	09.08.2021 16:50		24.0°C / 24.0°C	1 (Verdichti		Waldesch (2674)		C1)	16:56				
(2074) A61 Boppard - Waldesch (2674)		waitestri (1)	09.08.2021 15:21	47	23.0°C / 24.0°C	1 (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40507	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 16:55	Mischanlage		OK	Lp 4,0 %
 A61 Boppard Waldesch (2674) 	40439	731111 (2674 Boppard- Waldesch (1)	09.08.2021 14:12	46	23.0°C / 22.0°C	1 (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40470	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 15:24	Fertiger		OK	Lp = 4,0
A61 Boppard - Waldesch (2674)	40415	731111 (2674 Boppard- Waldesch C1)	09.08.2021 13:33		23.0°C / 22.0°C	1 (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40470	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 15:23	Mischanlage		OK	Lp = 4,3%
A61 Boppard - Waldesch (2674)	40394	731111 (2674 Boppard- Waldesch C1)	09.08.2021 12:45	45	23.0°C / 22.0°C	1. (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40439	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 14:22	Mischanlage		OK	Lp = 4,0%
A61 Boppard - Waldesch (2674)	40367	731111 (2674 Boppard- Waldesch C1)	09.08.2021 11:37		23.0 °C / 22.0 °C	1. (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40439	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 14:22	Fertiger		etwas zu trocken	Lp = 4,0
A61 Boppard - Waldesch (2674)	40356	731111 (2674 Boppard- Waldesch C1)	09.08.2021 11:23		23.0 °C / 22.0 °C	1 (Verdichti	ß	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40415	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 13:35	Fertiger		ОК	Lp = 4,2%
A61 Boppard - Waldesch (2674)	40326	731111 (2674 Boppard- Waldesch C1)	09.08.2021 10:27	44	21.0 °C / 17.0 °C	1 (Verdichti	ľ	A61 Boppard - Waldesch (2674)	40415	731111 (2674 Boppard-Waldesch C1)	09.08.2021 13:34	Mischanlage		OK	Lp = 3,9%

Abbildung 8-63: Expertentabellen der Frischbetonprotokolle und -beurteilung.

Die Erfassung der Positionen der zwei Fertiger ist der zweite Schwerpunkt. Hierbei wurde für die Baustelle mit dem mobilen Tracker von OAT, wie auf dem ersten Demonstrator für die Sprühbühne eingesetzt wurde, über den gesamten Baustellenzeitraum die Position des Oberbetonfertigers aufgezeichnet und an die BF4.0 WebApp übertragen. Der Verlauf des Fertigers ist in *Abbildung 8-64* auf der linken Seite dargestellt. Da nur die Demonstrationsstrecke in konventioneller Bauweise ausgeführt wurde, wurde nur dort ein Fertigerzug mit einem Unterbetonfertiger eingesetzt. Auf diesem Fertiger wurde ein Telematiksystem von Wirtgen eingesetzt. Der Verlauf des Unterbetonfertigers ist als Detailbild auf der rechten Seite der *Abbildung 8-65* dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kurve deutlich glatter ist als die des mobilen Trackers. Dies liegt vor allem an der Datenaufbereitung des Telematiksystems und dem Einsatz unterschiedlicher GPS Sensoren. Der Funktionsumfang im Vergleich zum ersten Demonstrator wurde um die Erfassung der Positionen der Dübel erweitert. Insgesamt sind 85 Dübel in der Datenbank der BF4.0 WebApp am Demonstrationstag eingegangen.



Abbildung 8-64: Positionen des Ober- und Unterbetonfertigers.

8.2.1.2 Datenanalyse der Betonherstellung

Im Rahmen der Rückführung der prozessrelevanten Daten im Betrieb zur Validierung und Optimierung des Prozessleitsystems wurde die Analyse der Betonherstellung neu aufgerollt. Hierzu wurde auf der gesammelten Datenbasis unterschiedliche Aspekte detailliert herausgearbeitet.

8.2.1.2.1 Genauigkeitsanalyse des Dosiersystems

Auf der Grundlage der Datenbasis des Arbeitspaketes AP A wurden die Genauigkeit des Dosiersystems untersucht. Insgesamt wurden 162 562 Dosiervorgänge über die vier Schwerpunktbaustellen KW I, KW II, Witt I und Witt II untersucht. Zur Analyse wird der absolute und relative Dosierfehler betrachtet, wobei der relative Dosierfehler sich auf die aus dem vorgegebenen Rezeptwert und die Korrektur bezieht.



Abbildung 8-65: Analyse der Dosiergenauigkeit der Gesteinsfraktionen.

Die Analyse der Gesteinsfraktionen ist in *Abbildung 8-65* dargestellt. Die Zeilen der neun Histogramme beschreiben unterschiedliche Materialien. Von oben nach unten wird das Material gröber und es sind die Histogramme für Sand 0/2, Kies 5/8 und Kies 16/22 gezeigt. Die Spalten beschreiben von links nach rechts die Verteilung der realen Einwaage des Waagevorgangs, des absoluten Dosierfehlers in Kilogramm und des prozentualen Dosierfehlers bezogen auf den Sollwert der Waage (Vorgabe+Korrektur). Es ist generell zu beobachten, dass die Einwaage des Sandes 0/2 und des Splitts 16/22 bei ca. 1500kg liegt. Der Kies 5/8 weist zwei deutlich unterschiedliche Sollwerte auf. Einen kleinen bei ca. 390kg und einen großen bei ca. 3200kg. Werden die Mittelwerte der Dosiergenauigkeit betrachtet, liegen diese nahe bei null. Somit wird im Produktionsmittel immer kein systematischer Fehler eingegangen. An der Standardabweichung ist sowohl absolut als auch prozentual eine Abnahme mit gröber werdendem Material zu verzeichnen. Für den Sand 0/2 ist eine Standardabweichung von 22,9kg/1,58% zu sehen und für den Kies 16/22 nimmt diese ab auf 4,5kg/0,29%. In der Abbildung ändert sich die Skalierung der x-Achse für den Kies 16/22.

Am Kies 5/8 ist der Effekt einer Normierung auf die Vorgabemenge des Dosierfehlers sichtbar. Der absolute Dosierfehler scheint keinen systematischen Einfluss von der Vorgabemenge zu erfahren. Daher ist die Verteilung des absoluten Dosierfehlers vergleichbar zwischen den unterschiedlichen Vorgaben. Wird nun der prozentuale Dosierfehler in der rechten Spalte betrachtet, ist auffällig, dass die Rezeptur mit der hohen Einwaage einen kleineren prozentualen Dosierfehler aufweist als die Rezeptur mit der kleine Einwaage. Dies wird durch die Normierung auf den kleinen Sollwert in der Prozentrechnung hervorgerufen. Somit ist die absolute Dosiergenauigkeit der Mischanlage scheinbar unabhängig vom Sollwert der Waage.

Die Zementdosierung weist keine systematischen Auffälligkeiten auf und besitzt einen mittleren absoluten Dosierfehler von 0,02kg und eine Standardabweichung von 4,32kg/0,48% über insgesamt 21279 Dosiervorgänge der vier Baustellen.

Die Wasserdosierung weist eine mittlere Dosiergenauigkeit von 0,13kg. Die Standardabweichung unterscheidet sich für die Baustellen in Köln-Wahn (2,56kg) zu denen in Wittlich (1.24kg). Dieser Unterschied könnte durch den unterschiedlichen Wasseranschluss der Mischanlage hervorgerufen werden, da in Köln-Wahn die Versorgung der Mischanlage direkt durch das Frischwassernetz versorgt wurde und in Wittlich eine separate Druckerhöhung mit einem Zwischenspeicher notwendig war.

8.2.1.2.2 Vergleich zwischen Handwert und Feuchteautomatik

Die Feuchte des Sandes ist eine wichtige Kenngröße für die Betonherstellung, da diese den Wassergehalt des Betons signifikant beeinflussen kann. Daher ist eine präzise Messung oder Schätzung des Mischmeisters essenziell. Im Verlauf der Baustelle Wittlich II wurde Feuchtemesstechnik kalibriert und der Betrieb der Mischanlage vom Handbetrieb, bei dem die Sandfeuchte durch den Mischmeister manuell adaptiert wurde, auf den Automatikbetrieb umgestellt. Es wurden ca. zwei Drittel der Produktion im Handbetrieb gefahren und ein Drittel im Automatikbetrieb.



Abbildung 8-66: Vergleich der Verteilungen zwischen dem Handwert und der gemessenen Sandfeuchte.

Wird davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Materialdurchsätzen und der kontinuierlichen Nachlieferung aus demselben Sandwerk sich die Eigenschaften des Sandes nicht ändern, kann der Handwert und die gemessene Sandfeuchte direkt verglichen werden. Ein Vergleich der Verteilungen ist in der *Abbildung 8-66* dargestellt. Auf der linken Seite ist die Verteilung des Handwerts und auf der rechten Seite der gemessenen Sandfeuchte dargestellt. Die Histogramme beschreiben die absoluten Häufigkeiten der Kennwerte.

Es ist zu beobachten, dass die gemessene Sandfeuchte (rechts) sich näherungsweise normalverteilt verhält. Eine Approximation der Normalverteilung ist als rote Linie eingezeichnet. Wird nun die Approximation der Sandfeuchteverteilung aus der gemessenen Sandfeuchte beim Handwert als rote Linie eingezeichnet ist auffällig, dass der Mischmeister mit der rechten Hälfte gut den Mittlerwert der gemessenen Sandfeuchte getroffen hat. Für die linke Hälfte des Handwerts könnte eine mögliche Erklärung sein, dass sich der Mischmeister von unten an die tatsächliche Materialfeuchte herangetastet hat. Dies würde bedeuten, dass durch die Wasserkorrektur der reale Wassergehalt unterschätzt wird und somit zu viel Wasser dosiert werden würde. Somit wäre eine konservative Strategie tendenziell eine höhere Materialfeuchte zu schätzen und über eine Wassernachdosierung während des Mischens eine Fehleinschätzung zu korrigieren.

In der soeben diskutierten Interpretation muss angemerkt werden, dass auch andere Effekte, wie eine tatsächlich andere Sandfeuchte zu Beginn der Baumaßnahme oder eine Korrektur der unterschätzen Feuchte an anderer Stelle stattgefunden hat. Der Beton wurde durch die Qualitätssicherung aus der Frischbetonüberwachung kontinuierlich überwacht und erfüllt die normativen Rahmenbedingungen. Daher ist davon auszugehen, dass der Wassergehalt im Beton den Anforderungen entsprochen hatte.

8.2.1.2.3 Korrelationsanalyse der digitalen Lieferscheine

Um Korrelationen zwischen Kennwerten der digitalen Lieferscheine zu identifizieren wurde eine Korrelationsanalyse mit einer Streudiagramm Matrix durchgeführt. In einem Streudiagramm werden zwei Kennwerte als Punktewolke aufgetragen, wobei jede Achse einem Kennwert zugeordnet ist. So können einfache eindimensionale Abhängigkeiten visuell erkannt werden. Beispielsweise sind lineare Abhängigkeiten als Gerade im Streudiagramm sichtbar. Eine Streudiagramm Matrix ist die Aufstellung mehrere Kennwerte als Matrix. Somit werden auf allen Nebendiagonal Streudiagrammen der Vergleich zweier Kennwerte gezeigt und es können systematisch Korrelationen identifiziert werden. Da die Diagonale in dieser Betrachtung keine Information trägt, wird die Verteilung der Kennwerte als Histogramm dargestellt.

Aufgrund der großen Datenmenge wurden alle Baustellen und Rezepturen einzeln betrachtet. Exemplarisch ist in *Abbildung 8-67* eine Streudiagramm Matrix für den Unterbeton der Baustelle Wittlich II gezeigt. Dargestellt sind die Kennwerte Mischzeit (actmixtime), Konsistenz (actcons), Leistung zum Ende des Mischprozesses (conspowermixend), Wassergesamtmenge (sumwater), WZ-Wert (WC), Betontemperatur (actconctemp), Lufttemperatur (airtemp) und das Gesamtgewicht (actweight).

Auffällig ist, dass zwei vermeintliche lineare Zusammenhänge bestehen. Einerseits der Zusammenhang zwischen der "gemessenen" Konsistenz (actcons) und der Leistung zum Ende des Mischprozesses (conspowermixend). Anderseits existiert zwischen der Wassergesamtmenge (sumwater) und dem WZ-Wert (WC) ein linearer Zusammenhang. In beiden Fällen handelt es sich um berechnete Größen. Die Konsistenz wird über eine Kennlinie aus der Leistung zum Ende des Mischprozesses geschätzt. Ebenfalls ist an den zwei Linien sichtbar, dass die Kennlinie während des Betriebs der Baustelle angepasst wurde. Der WZ Wert sich aus der gesamten Wasser- und Zementeinwaage berechnet. Die Zementmenge sorgt in diesem Fall für die Streuung um die Gerade.

Die Rasterung bei den Temperaturen wird durch die Auflösung von einem Kelvin bei den Temperaursensoren hervorgerufen. Ebenfalls bei der Betrachtung der Temperaturen ist ein Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur (airtemp) und der Betontemperatur (actconctemp) erkennbar. Wenn die Lufttemperatur steigt, dann steigt die Betontemperatur.

Nach der Abbildung scheint die Mischzeit keinen systematischen Einfluss auf die Konsistenz oder die Leistung zum Ende des Mischprozesses zu besitzen.



Abbildung 8-67: Streudiagramm Matrix der Kennwerte der digitalen Lieferscheine für den Unterbeton der Baustelle Witt II.

8.2.1.3 MPS3 Dashboard

Die Auswertungen und Analysen des Forschungsvorhabens sowie die Erfahrungen mit der BF4.0 WebApp finden Anwendung in der Entwicklung eines internen Tools zur Analyse von Liebherr Mischanlagen, das *MPS3 Dashboard*. Dieses Tool dient vor allem der interaktiven Auswertung einzelner Aspekte einer Mischanlage. Einerseits steht die Erkennung von Unregelmäßigkeiten im Vordergrund. Anderseits können neue Auswertungen auf der Basis der digitalen Lieferscheine erprobt werden. Hierbei sind aktuell die drei Seiten *Produktionsstatistik, Waagesystem* und *Materialfeuchte* stark durch die Erfahrungen im Forschungsvorhaben inspiriert.

Zum allgemeinen Überblick über die Produktion der Anlage dient die Seite *Produktionsstatistik*. Es werden analog zu der BF4.0 WebApp das gesamte Produktionsvolumen tageweise als Balkendiagramm über einen auswählbaren Zeitraum aufbereitet. Über diese Produktionsstatistik kann per Klick auf einen Balken der Zeitverlauf der Tagesleistung ausgewählt werden. Die gesamten umgeschlagenen Betonvolumen und Anzahl der Chargen werden getrennt nach Rezeptur für die Tagesleistung tabellarisch angezeigt. Ein Ausdruck der Seite für den 2. Demonstrator kann der Anlage entnommen werden.

Die Analyse des Waagesystems findet auf der Seite *Waagesystem* statt. Es kann über ein Dropdown Menü das zu betrachtende Material ausgewählt und ein Zeitbereich über ein DatePicker eingestellt werden. Die Auswertung zeigt allgemeine Kennzahlen, wie beispielsweise die Anzahl der Waagevorgänge und das umgeschlagene Material. Der absoluten Dosierfehler, wie er auch in Abschnitt 8.2.1.2.1 genutzt wurde, wird als Histogramm und Streudiagramm über die reale Einwaage aufbereitet. Zusätzlich wird zur Analyse eine Normalverteilung als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion approximiert und der Mittelwert sowie die Standardabweichung den Kennwerten hinzugefügt. Damit Ausreißer weiter analysiert werden, kann per Klick auf die Punkte im Streudiagramm auf die Chargeninformationen zugegriffen werden. Der Ausdruck der Seite in der Anlage zeigt beispielhaft die Analyse der Zementwaage für den Zeitraum des 2. Demonstrators. Rechts unten in dem Streudiagramm ist der HoverText angezeigt, welcher den Klick zum Zugriff auf die Lieferscheindaten symbolisiert.

Die dritte Analyseseite ist die *Materialfeuchte*. Es kann ebenfalls über ein Dropdown Menü das zu betrachtende Material und über einen DatePicker ein Tag ausgewählt werden. Als Materialfeuchte über Zeit Diagramm wird für den gewählten Tag und Material der Feuchteverlauf dargestellt. Da es allgemein möglich ist das Material aus unterschiedlichen Silos dosiert wird, sind die Punkte für die verschiedenen Silos farbcodiert. Analog zu dem Waagesystem können die Chargeninformationen zu den Datenpunkten per Klick abgerufen werden.

8.2.1.4 Auswertung der Messdaten auf der Baustelle

Die gesamte Baumaßnahme Wittlich 3 wurde vom entwickelten Ebenheitsmesssystem an allen Baustellentagen begleitet. Das System arbeitete bis auf kleinere Besonderheiten robust und unauffällig. Lediglich am 11. Nov. 2020 ganztägig und am 23. Nov. 2020 morgens gab es Komplikationen, die den Systemstart verhinderten. Nach einem Neustart arbeitete das System wieder erwartungsgemäß.

Der konstruierte Scannerausleger ist vibrationsarm und starr, von Störungen oder Behinderungen des Baustellenbetriebs durch die Konstruktion wurde nicht berichtet. Die Tageszählernullung wurde täglich durch den Maschinenbediener ausgeführt, was zeigt, dass das System angenommen wurde. Die folgende Abbildung 8-68 zeigt die Daten, die zum digitalen Leitstand versandt wurden und dort visualisiert werden:



Abbildung 8-68: Fahrstrecke einer Tagesleistung, Einbauhistorie, Trajektorie des Fertigers der Gesamtmaßnahme

Die Ebenheitserkennung live auf der Maschine funktionierte nicht. An dieser Stelle soll die Untersuchung hierfür angestellt werden. Hierzu wird ein Vergleich mit den Daten, die am Technikum in Aachen aufgezeichnet wurden, angestrebt.

Zunächst wird die Ebenheitsbestimmung anhand von aufgezeichneten Daten aus Aachen dargestellt (Abbildung 8-69):



Abbildung 8-69: Ebenheitsauswertung Aachen

Im oberen Plot werden zwei aufeinanderfolgende, geglättete Profile dargestellt. Es lässt sich bereits hier gut erkennen, dass sich die beiden Profile sehr stark ähneln und nur eine Verschiebung in Längsrichtung die beiden Profile unterscheiden. Im unteren Diagramm wird die Kreuzkorrelation dargestellt. Der rote Hintergrund kennzeichnet eine nicht zulässige Rückwärtsbewegung. Am Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion herrscht die größte Übereinstimmung der beiden Signale vor. Verschiebt man also die beiden Profile um den ermittelten Wert, so passen die beiden Profile bestmöglich übereinander. Die Abbildung 8-70 zeigt die so überlagerten Profile.



Abbildung 8-70: Beispielhafte Überlagerung zweier Profile einer Messaufzeichnung aus Aachen

Offensichtlich legt der Algorithmus die beiden Profile hervorragend aufeinander. Dieses Verfahren lässt sich für die Daten aus Aachen beliebig wiederholen.

Die folgende Abbildung 8-71 zeigt zwei typische, geglättete aufeinanderfolgende Profile, die beim Bauvorhaben Wittlich 3 aufgezeichnet wurden. In den beiden Profilen im oberen Graphen ist zu erkennen, dass deutlich kleinere Amplituden, dagegen allerdings höhere Frequenzen vorliegen. Dies führt auch letztlich in der Kreuzkorrelation zu einem hochfrequenten Rauschen und einer nicht eindeutigen Lösung – es gibt mehrere Maxima zu unterschiedlichen Verschiebungen. Eine exakte Lösung, wie weit die beiden Profile übereinander geschoben werden müssen, gibt es demnach nicht, was dazu führt, dass eine Ebenheitsdetektion in diesem Falle nicht möglich ist.



Abbildung 8-71: Ebenheitsauswertung Wittlich 3

An dieser Stelle soll untersucht werden, warum sich die Signale des Laserscanners in Aachen und Wittlich so stark unterscheiden. Abbildung 8-72 zeigt hierfür zunächst zwei typische Profile aus Aachen (blau) und Wittlich (rot) in einem Plot. Die Signale sind an dieser Stelle noch nicht geglättet.



Abbildung 8-72: Typische Oberflächenscans vom Prüfstand Aachen und Baumaßnahme Wittlich 3
Es ist gut erkennbar, dass die Amplituden des Signals aus Aachen größer sind, gleichzeitig sind die hochfrequenten Anteile in Wittlich deutlich stärker. Optische Messverfahren fangen oft das Rauschen an, wenn Umgebungshelligkeit eine Rolle spielt. Deshalb soll weiter geprüft werden, ob eine zu hohe Umgebungshelligkeit auch hier der Auslöser ist.

Da tagsüber erwartungsgemäß größere Helligkeiten zu erwarten sind als morgens und abends, wird geprüft, ob das Rauschen zu dieser Zeit auch größer ist. Das Rauschen wird ermittelt durch das Bilden der Fehlerquadratsumme, die die Abweichung der Messwerte gegenüber einer Gerade angibt. Je größer diese Summe ist, desto stärker rauscht das Signal. Es wurden sechs beliebige Tage des Bauvorhabens untersucht. Die Fehlerquadratsumme aufgetragen über die Tageszeit zeigt die folgende Abbildung 8-73.



Abbildung 8-73: Stärke des Rauschens des Laserscanners über sechs verschiedene Baustellentage

Es ist gut zu erkennen, dass das Rauschen mittags am größten ist und zum Morgen und Abend geringer wird. Das bedeutet, dass trotz der Abschattung die Umgebungshelligkeit auf der Demonstratorbaustelle größer war als am Technikum Aachen. Aufgrund des sehr langen Auslegers des Laserscanners von ca. 3 Metern war es nicht möglich die Abschattung näher an die Betonoberfläche zu bringen, damit die Abschattung bei Regelvorgängen nicht den Frischbeton beschädigt. Aus diesem Grund hing die Abschattung etwa 10 cm über der Oberfläche, während diese am Technikum in Aachen nur wenige Millimeter über der Oberfläche angebracht war.

Im Rahmen des Projektes konnte eine Dokumentationsanwendung aufgebaut werden, mit dessen Hilfe sich sämtliche Qualitätsparameter des Betoneinbau prozessintegriert und live verfolgen lassen. Hierfür wurden mehrere Konzepte ausgearbeitet, mit denen sich die Einbauqualität bereits am Fertiger bewerten lässt. In einer Evaluierung wurde ein Konzept ausgewählt, welches erfolgreich bis hin zur Baustellenerprobung gebracht wurde. Mit der Hilfe einer veränderten Konstruktion, die den Scanner vor Umgebungslicht schützt, kann das Konzept optimiert werden.

Durch die implementierte WebApp lassen sich Baustellenkennwerte abrufen, ohne die Baumaßnahme vor Ort besichtigen zu müssen. Durch das Einbinden von Mischwerk, LKW sowie Nachbehandlungsgeräten wird die gesamte Baumaßnahme transparent. Der digitale Leitstand bietet die perfekte Grundlage zur Prozess- und Logistikoptimierung und bietet die Möglichkeit des unmittelbaren Eingreifens. Die WebApp bietet die Möglichkeit der Implementierung weiterer Analysetools, um so den Baustellenablauf noch besser nachzuvollziehen, zu dokumentieren und zu optimieren.

8.2.1.5 Validierung der GPS Datenverarbeitung für die Materiallogistik

Durch die BF4.0 WebApp wurde, wie in Abschnitt 7.3.4.3.3, vorgestellt die GPS Position der meisten LKW in der Materiallogistik aufgezeichnet. Parallel zu der Erfassung der Logistikfahrzeuge durch die BF4.0 WebApp wurden die Zeitstempel der Rundenstation für die Fahrzeuge durch das Baustellenpersonal händisch dokumentiert.

Der Datenbestand der Positionsmeldungen in der BF4.0 WebApp reichte von 14% bis 100% der theoretisch maximal möglichen Anzahl an Positionsmeldungen, welche über die Logisitkschnittstelle bei der BF4.0 WebApp eingegangen sind. Dies ist auf die zum Teil sehr schlechte Mobilfunkverbindung der LKW-Fahrer und der ländlichen Lage der Baustelle zurückzuführen. Weiter wurden die GPS Standorte anhand des mitgelieferten Genauigkeitswert gefiltert. Damit reduzierte sich die Datenquantität weiter um 1 bis 85%. Somit sind manche Fahrzeuge aufgrund des hohen Datenverlustes durch entweder einen schlechten Mobilfunkempfang oder durch ein schlechten GPS Sensor nicht zuverlässig auswertbar.

Die Rundenzeitauswertung wurde, wie in Abschnitt 7.2.4.1 gezeigt, anhand von GeoFences um die Mischanlagen- und Fertigerposition aus dem Standort der Fahrzeuge durchgeführt. In Abbildung 8-74 ist dieses Vorgehen auf der linken Seite anhand der Demonstratorbaustelle schematisch dargestellt. Es ist oben in der Karte die Mischanlagen und unten der Fertiger mit den entsprechenden GeoFences zu sehen. Die LKWs sind als Pins mit der Kennung UB und OB sowie einer Nummer dargestellt. Auf der rechten Seite sind die rekonstruierten Rundenzeiten eines Tages für drei verschiedene Fahrzeuge tabellarisch dargestellt. Die Farbcodierung der Zellen zeigt die Abweichung zu den manuell erfassten Zeitstempeln. Dabei bedeutet grün eine Abweichung kleiner 5 min, gelb kleiner 15 min, rot kleiner 24 h und farblos größer 24 h. Da die Station Ankunft an der Mischanlage (at_plant) nicht händisch erfasst wurde, wird diese immer gelb bzw. rot dargestellt. In den oberen beiden Tabellen in der Abbildung fehlen Runden oder wurden nicht alle Stationen erkannt. Dies wird durch den Datenverlust bedingt durch den Mobilfunkempfang und GPS Sensor verursacht. Wenn die Datenqualität gut ist, zeigt diese Herangehensweise sehr gute Ergebnisse im Vergleich zu den händisch erfassten Werten. Dies ist in der unteren Tabelle in der Abbildung zu sehen.



Abbildung 8-74: Vergleich der rekonstruierten Rundenzeiten mit der manuellen Erfassung der unterschiedlicher Logistikfahrzeuge.

8.2.1.6 Automatische Nachbearbeitungsdokumentation

Die Idee hinter dieser Auswertung ist es das Baustellenpersonal zu entlasten und den allgemeinen Fortschritt der Baustelle automatisch zu dokumentieren. Hierzu sollen die Telematik Daten der Nachbearbeitungsmaschinen herangezogen werden um den zeitlichen Fortschritt alle 50 m mit einer Meldung im Protokoll zu versehen. Das Personal dokumentiert Beobachtungen, Tests und Unregelmäßigkeiten.

In Abbildung 8-75 ist das konzeptionelle Vorgehen gezeigt. Hierbei wurden die automatisch generierten Meldungen in dem Fortschrittsbericht im Bemerkungsfeld mit einem Kommentar versehen. Bei der genaueren Betrachtung passen die Station und Zeitmeldungen an den meisten Tagen gut zu den manuell erfassten Datensätzen. Vor allem bei den Bürst- und Schneidprotokollen konnten Abweichungen festgestellt werden. Dies liegt an dem engen Zeitplan bei den Arbeitsschritten und dass die Protokolle zum Teil erst später erfasst werden können.



Abbildung 8-75: Konzept der automatischen Bauwerksdokumentation für die Nachbearbeitung.

8.2.1.7 Analyse zur Rückverfolgbarkeit

Im Rahmen der ersten Demonstrators A1 Wittlich-Hasborn wurde erstmals alles Prozessschritte vollständig digital erfasst. Vor allem die Materiallogistik spielt hier eine zentrale Rolle, da sie das Bindeglied zwischen der Betonproduktion und des Einbaus ist. Somit ist es an dieser Maßnahme möglich eine Analyse der Rückverfolgbarkeit durchzuführen. D.h. es wird untersucht welche Charge wo und wann sie eingebaut wird und die einzelnen Bearbeitungsschritte durchgeführt werden. Diese Auswertungen unterliegen jedoch bedingt durch den Herstellprozess einer gewissen Unschärfe und müssen unter dieser Voraussetzung entsprechend interpretiert werden. Diese Unschärfe wird beispielsweise durch die Vermischung von 4 Chargen auf einen LKW und von zwei LKW beim Einbau hervorgerufen.

Da alle Daten immer mit allen Markern zusammen aufgezeichnet wurden liegen für die Analyse immer alle weiteren Prozessgrößen implizit vor. Beispielsweise ist die Mischzeit, alle Einwaagen, das Leistungsprofil, usw. im digitalen Lieferschein einer Charge zugeordnet und kann auf diese Weise mit durch die Prozesskette abgebildet und interpretiert werden. So kann an der Betonproduktion aufgehängt eine Grafik aufgebaut werden, bei der alle korrespondierenden Daten dargestellt sind. So werden jedem LKW 4 Chargen zugeordnet. Jeder Charge ist ein digitaler Lieferschein und, wenn vorhanden, der Frischbetontest bzw. -beurteilung durch den Baustoffprüfer zugeordnet. Über den LKW sind über die manuelle Aufzeichnung die Zeitstempel der verschiedenen Stationen bekannt. Aus den Telematikdaten des Fertigers kann der entsprechende Zeit- und Positionsbereich, sowie die Prozessdaten, welche in der Maschine vorliegen, extrahiert werden. Über die Position der

Nachbearbeitungsmaschinen und aus den Protokolldaten können die korrespondierenden Bereiche der Nachbearbeitung ausgeschnitten und diese Daten zu den Bearbeitungsschritten zugeordnet dargestellt werden. Zusätzlich zu den reinen Messwerten können Tagesstatistiken zur besseren Einordnung der Werte oder des Einbautags aufbereitet werden. Eine beispielhafte Zusammenstellung dieser Idee ist in Abbildung 8-76 als Big Picture der Rückverfolgbarkeit gezeigt. Um eine solche Auswertung automatisch erstellen zu können, ist es essentiell die Daten entsprechend aufzuzeichnen und Algorithmen zur Auswertung zu entwickeln. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte kurz gezeigt.



Abbildung 8-76: Big Picture der Rückverfolgbarkeit.

Der erste Schritt ist die Synchronisation der Qualitätssicherungstest und Beobachtungen der Frischbetonherstellung. Dies wurde direkt bei der Erfassung durch den Baustoffprüfer erreicht, indem die Kennung der Betoncharge erfasst wurde. Über diese Kennung ist eine Eins-zu-Eins Zuordnung trivial. Beispielsweise kann so der durch den Baustoffprüfer erfasste Konsistenzwert mit dem durch die Mischanlage rekonstruierten Wert aus der Konsistenzschätzung verglichen werden. Dieser Vergleich ist in Abbildung 8-77 dargestellt. Der obere Plot zeigt alle eindeutig zugeordneten Konsistenzen, welche über den gesamten Demonstrator erfasst wurden. Unten links ist die Abweichung zwischen Baustoffprüfer und Mischanlage über die Chargen gezeigt und rechts ein Histogramm zu diesen Fehlern.



Abbildung 8-77: Konsistenzvergleich zwischen Mischanlage und Frischbetonuntersuchung.

Die Zuordnung einer Runde der Materiallogistik konnte ebenfalls durch eine Eins-zu-Eins Zuordnung erreicht werden. Hierzu wurden alle Lieferungen der Mischanlage über die Lieferscheinnummer, welche nicht wie die BatchID für jede Charge inkrementiert wird, sondern mit jeder LKW Lieferung wächst. Somit wird eine chronologische Zuordnung über die produzierten Lieferungen und den erfassten Runden durchgeführt.

In Abbildung 8-78 sind auf Basis dieser Zuordnung die Zeitdifferenzen ab Produktionsbeginn der ersten Charge dargestellt. Links sind die Zeiten der Unterbetonherstellung und rechts der Oberbetonherstellung für den 12.11. des Demonstrators gezeigt. Die Station Vollwägung bedeutet ein Verlassen des Mischanlagengeländes, Baustelle eine Ankunft auf der Baustelle vor dem Fertiger, Kippbeginn den Beginn der Betonentladung und Entladeende das Verlassen des Baustellengeländes. Diese Zeitstempel stammen aus der manuellen Erfassung der Materiallogistik. Es ist gut zu erkennen, dass die Produktion der vier Betonchargen sehr gleichmäßig abläuft und ca. 5 min dauert. Die Fahrt zum Baustellengelände dauert ca. 10 min und ist ebenfalls sehr gleichmäßig. Es ist jedoch bei beispielsweise Charge 57 der Unterbetonherstellung eine Spitze zu beobachten. Dies wird durch lückenhafte Daten hervorgerufen. Vermutlich wurde durch den Mitarbeiter diese Station des LKW nicht auf der Baustelle eingetragen. Das Abkippen des Betons beginnt unregelmäßiger da dies an den Fortschritt des Fertigers gekoppelt ist. Weiter ist die Erfassung dieses Zeitstempels durch die Position des Mitarbeiters erschwert und unterliegt somit zusätzlicher Varianz. Dies wird ebenfalls durch ein häufigeres zusammenfallen der Spitzen mit der Station Entladeende (orange mit blau) unterstützt. Der Einbau der Charge ist für den Unterbeton zwischen 20 und 30 min für den Unterbeton abgeschlossen. Der Einbau des Oberbetons ist zwischen 25 und 55 min abgeschlossen. Die höheren Einbauzeiten des Oberbetons stammen vermutlich aus der Kopplung des Ober- und Unterbetonfertigers, sowie die deutlich höheren Umschalgsmengen des Unterbetons. Somit dauert der Einbau eines Oberbeton LKWs länger.



Abbildung 8-78: Zeitdifferenzen der Materiallogistik ab Produktion der ersten Betoncharge (links Unterbeton, rechts Oberbeton).

Der nächste Schritt ist die Verlinkung aller positionsbezogenen Daten. Dazu werden alle GPS Positionen, wie in Abschnitt 7.2.4.2 beschrieben, auf die Baustellenstation umgerechnet. Die Telematikdaten der Maschinen enthalten nicht nur Daten während des Durchführens des Arbeitsschrittes, sondern alle Bewegungen welche auf der Baustelle durchgeführt wurden. Im Speziellen sind die Ein- und Ausfahrgänge zu Schichtbeginn und ende enthalten. Da die Sprühprotokolle sehr zuverlässig den Tagesbeginn und -ende dokumentieren, wurde die ersten und letzte Station der Sprühprotokolle als Bereich für die Tagesleistung gewählt. Um das Ausfahren der vorherigen Schicht und das Einfahren der folgenden Schicht zu eliminieren, wurde auf Basis der Zeitstempel in den Protokollen ein valider Zeitbereich identifiziert. Das Resultat dieses Vorgehens für eine Einbauschicht des Demonstrators ist in Abbildung 8-79 als Ort über Zeit Diagramm dargestellt. In gestrichelt rot ist die Position des Fertigers gezeigt. Jeweils in rot, grün und blau sind die Position der Sprühbühne, Bürste und Schneidmaschine dargestellt. Mit gleicher Farbcodierung sind als Punkte die erfassten Protokolle eingezeichnet. Das Bürsten wird abschnittsweise durchgeführt und unterliegt somit einer Schwingung. Für den zeitlichen Ablauf auf der Baustelle ist diese Schwingung nicht relevant. Um die Zeitdifferenzen der Kurven zu bestimmen ist es hilfreich, wenn der Fortschritt der Maschinen monoton ist. Daher wurde ein monotoner Mittelwertfilter entworfen und realisiert. Das Ergebnis dieses Filters ist als schwarze Linie über der Position der Maschinen dargestellt.



Abbildung 8-79: Aufbereitung der positionsbezogenen Daten.



Abbildung 8-80: Zeitdifferenzen der Nachbearbeitungsschritte ab Einbau.

Die Zeitspannen ab Einbau des Betons durch den Fertiger können als Differenzen der gestrichelten roten Linie zu den gefilterten Linien der Nachbearbeitungsschritte bestimmt werden. Mit der bereits eingeführten Farbcodierung ist dies für den 12.11. in Abbildung 8-80 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Sprühbühne fast unmittelbar hinter den Fertiger fährt. Ca. 10 bis 13 h nach Einbau wird die Oberfläche ausgekehrt und nach ca. 23 bis 25 h die Fugen geschnitten werden. In beiden Fällen ist ein zeitliches Vorarbeiten von einem späteren Zeitpunkt zu einem früheren durch den schnelleren Fortschritt als der Einbau zu verzeichnen. Es wurde bei Erreichen der unteren Schwelle des Zeitbereichs eine Pause gemacht bis wieder begonnen werden konnte.

Das Erreichen der unteren Schwelle wurde auf der Erfahrung des Baustellenpersonals und nicht anhand dieser Auswertung entschieden, da diese Untersuchungen im Nachgang zur Baustelle erfolgten.

Nach erfolgreicher und separater Verlinkung der chargenbezogenen sowie batchbezogenen Daten bleibt die Verlinkung der zwei Domänen durchzuführen. Da für den Demonstrator lediglich der Oberbetonfertiger mit einem Telematiksystem ausgestattet war, ist nur die GPS Position dieses Fertigers bekannt. Daher kann die Rückverfolgbarkeitsanalyse nur für den Oberbeton erfolgen. Der Oberbeton wird direkt an der Stelle eingebaut an der er abgekippt wird, weil die Beschickung des Oberbetons mit einem Förderband über den Unterbetonfertiger erfolgt. Damit folgt, dass das korrespondierende Fahrbahnstück zwischen Kippbeginn und Entladeende gefertigt wird. Werden diese Zeitstempel aus der Materiallogistik und die Position des Fertigers an dieser Stelle ausgewertet, ergeben sich die rote und grüne Linie im Ort über LKW Ladungs Diagramm in Abbildung 8-81. Der grüne und rote Punkt auf vertikaler Achse beschreiben den Beginn und das Ende des Fahrbahnstrücks. Bei einer idealen Erfassung der Zeitstempel sollte auf horizontaler Linie zu jedem roten Punkt ein grüner Punkt folgen. Anschaulich interpretiert heißt das, dass auf jedes Ende einer LKW Ladung mit dem Beginn einer neuen LKW Ladung beginnt. Es wird sofort klar, wenn die gezeigten Kurven interpretiert werden, dass die Qualität der händisch erfassten Zeitstempel eine nicht plausible Auswertung mit sich führen würde. Es würden LKW Ladung ohne eine "Länge" eingebaut werden, da vertikal grüne und rote Punkte aufeinander fallen (fehlender Zeitstempel in der Materiallogistikerfassung). Manche Sektionen würden "mehrfach" eingebaut werden (Ladung 33 bis 36). Da dies nicht plausibel ist, wurde je LKW Ladung ein gleich großes Fahrbahnstück gewählt. Dieser interpolierende Ansatz ist ebenfalls in Abbildung 8-81 als blaue und orangene Linie eingezeichnet. Hierbei wurde die gesamte Strecke des Fertigers ab Kippbeginn der ersten und Entladeende der letzten Charge in gleich große Fahrbahnstücke je LKW Ladung unterteilt. Damit ergibt sich rechnerisch für den 12.11. eine mittlere Fahrbahnstücklänge je LKW Ladung von 11,12 m und eine mittlere Schichtdicke von 7,8 cm.



Abbildung 8-81: Vergleich zweier Ansätze zur Synchronisation zwischen Materiallogistik und Einbau.

Da nun ein vollständig verlinkter Datensatz vorliegt, kann analog zu den vorausgegangenen Auswertungen die Zeitspannen der einzelnen Prozessschritte bestimmt werden. Das zugehörige Station über Zeitspanne ab Beginn der Produktion der ersten Betoncharge Diagramm ist in Abbildung 8-82 dargestellt. An diesem Diagramm kann jeder Prozesszeitpunkt ab Produktion nachvollzogen werden. Begonnen ab dem Verlassen der Mischanlagengelände über den Einbau bis hin zu den Nachbearbeitungsschritten werden die Prozessschritte von links nach rechts aufgetragen. Durch die Diskretisierung mit den Oberbeton LKW Ladungen ist im Vergleich zu den vorhergegangenen Auswertungen die Auflösung schlechter geworden. Dies ist vor allem an den positionsbezogenen Schritten zu erkennen.



Abbildung 8-82: Zeitdifferenzen aller Prozessschritte ab Betonherstellung.

Alle bisher gezeigten Darstellungen beziehen sich auf die Einbauschicht vom 12.11. des Demonstrators. Prinzipiell ist es möglich diese Verlinkung für alle Tage durchzuführen, jedoch dies ist aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich. Meistens konnten nicht alle notwendigen Daten aufgezeichnet werden. So ist am Anfang die Schnittstelle der Mischanlage noch nicht 100% korrekt gelaufen und es wurden keine Lieferscheinnummern generiert und an zwei Tagen ist die Fertigertelematik ausgefallen. Die manuelle Erfassung der Materiallogistik erfolgte erst ab dem 09.11. und durch den regen Betrieb auf der Baustelle kann es vorkommen, dass nicht alle LKW Runden manuell erfasst werden. Da die Eingrenzung der Nachbearbeitungsschritte stark auf den Protokollen beruht, muss aktuell jeder Bearbeitungsschritt aktuell mindestens ein Protokoll je Tag erfassen. Das könnte auch über eine andere Heuristik umgangen werden. Diese Gründe sind in Tabelle 8.2 tagesgenau zusammengefasst. Hierbei wird ersichtlich, dass eine vollständige Betrachtung nur am 12.11. möglich ist. Über eine manuelle Nachbearbeitung und das Zusammenführen der GPS Aufbereitung mit der manuellen Materiallogistik kann sicher die Datenqualität weiter verbessert werden. Dies steht jedoch aktuell nicht im Fokus der Untersuchungen.

Tag	Mischanlage	Logistik (manuell)	Fertiger	Nachbearbeitung
04.11.	Keine Lieferscheinnr.	Keine Aufzeichnung		Keine Schnittprotokolle
05.11.	Keine Lieferscheinnr.	Keine Aufzeichnung		Keine Schnittprotokolle
06.11.	Keine Lieferscheinnr.	Keine Aufzeichnung		Keine Schnittprotokolle
<i>09.11</i> .	Keine Lieferscheinnr.			
10.11.	Keine Lieferscheinnr.			
11.11.			Telematikausfall	
12.11.				
<i>13.11.</i>		1 Runde fehlt		
<i>16.11.</i>		5 Runden fehlen		
17.11.				Bürstp. unplausibel
18.11.		2 Runden fehlen		Schnittp. unplausibel
20.11.		1 Runde fehlt		Keine Schnittprotokolle
<i>23.11.</i>		1 Runde fehlt	Telematikausfall	Keine Schnittprotokolle

Tabelle 8.2: Beobachtungen der Datenqualität hinsichtlich der Rückverfolgbarkeitsanalyse.

Zu beachten ist, dass bei allen gezeigten Auswertung der Materialfluss im Vordergrund stand um das Vorgehen zur Rückverfolgbarkeit zu untermauern. Wie es bereits in Abbildung 8-77 durch den Konsistenzvergleich angedeutet wurde stehen immer alle beteiligten Prozessgrößen zur Verfügung und anhand des Vorgehens kann man unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen entlang der gesamten Prozesskette verwerten. Beispielsweise wären positionsbezogene Verwertung von Kenngrößen aus dem Mischprozess somit denkbar.

In diesem Abschnitt wurde das konzeptionelle Vorgehen zum Aufbau und der Auswertung eines vollständig verlinkten Datensatzes von dem Mischen über Materiallogistik und Einbau bis hin zu den Nachbearbeitungsschritten demonstriert. Hierbei konnte an einem Tag diese Verlinkung für die Demonstrationsbaustelle A1 Wittlich-Hasborn durchgeführt werden. Die anschließenden Untersuchungen zur Rückverfolgbarkeit geben einen Einblick in das Potential weiterer Untersuchungen und zeigen die gute Datenqualität der Baustelle. Weiter kann der erfolgreiche Einsatz der implementierten digitalen Methoden auf der Baustelle paustellenpraktisch validiert. Die praktischen Herausforderungen auf der Baustelle, wie die manuelle Datenerfassung der Materiallogistik, zeigen die Limitierungen eines unvollständigen der durchgeführten Untersuchungen auf. Weiter kann das Verfahren sowie die prozessbedingte Unschärfe mit den aufgezeichneten Informationen nicht validiert werden. Konkret bedeutet das beispielsweise, dass keine Genauigkeit oder Unschärfe zu dem Einbauort einer Charge aus der Mischanlage angegeben werden kann, da der tatsächliche Einbauort unbekannt ist.

8.2.2 D2.2 - Validierung der Eigenschaften der optimierten Fahrbahnbetone

Im Folgenden wird über die Untersuchungsergebnisse der ersten und zweiten Demonstrationsbaustelle berichtet. Die Demonstratoren unterscheiden sich in der Bauweise, den Betonausgangsstoffen und der Betonzusammensetzung (Tabelle 8.3).

BAB A61
AS Boppard – AS Waldesch
einschichtig/zweilagig
Ober-/Unterbeton 0/22
C35/45
C1/F2
CEM III/A 42,5 N
360 kg/m³
0,42/0,43
4,5/ 5,5 Vol%
30 Vol%
-
15 Vol%
-
25 Vol%
30 Vol%

Tabelle 8.3: Auszug aus den Mischungsberechnungen der beiden Demonstrationsbaustellen unter Angabe der Bauweise

Bei der ersten Demonstrationsbaustelle auf der BAB A1 zwischen Wittlich – Hasborn mit einer Gesamtlänge von 5,4 km wurden insgesamt 20 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm im Standstreifen entnommen. Der Fahrbahndeckenbeton wurde zweischichtig hergestellt, wobei der Oberbeton als Waschbeton ausgeführt wurde. Anhand den Aufzeichnungen aus der BF4.0 WebApp waren die Tagesleistungen bekannt. Mittels dieser Information wurden am Tag mit der maximalen Tagesleistung fünf Bohrkerne zur Entnahme ausgewählt, am eigentlichen Demonstrationstag vier Bohrkerne. Die restlichen elf Bohrkerne wurden so verteilt, dass je ein Bohrkern pro Tagesleistung entnommen wurde.

An der Manteloberfläche der Bohrkerne war ein Basalt als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. Größere Gesteinskörner waren sowohl im Ober- als auch im Unterbeton überwiegend gleichmäßig verteilt. Das Größtkorn im Oberbeton betrug 8 mm, im Unterbeton 22 mm. Das Betongefüge war dicht und fest.

Der E-Modul wurde im Probenalter von 151 bis 167 Tagen an allen 20 Bohrkernen ermittelt. Der Mittelwert wurde zu 35.500 MPa ermittelt, der Variationskoeffizient zu 4,6 %. Auffällig war der E-Modul der allerersten Tagesleistung mit 38.800 MPa (Abbildung 8-83), welcher außerhalb der zweifachen Standardabweichung lag, ebenso wie die Rohdichte mit 2,57 kg/dm³ (Abbildung 8-84). Beide Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Luftporengehalt an dieser Stelle zu gering ist.

Alle anderen E-Moduln liegen innerhalb der ersten bzw. zweifachen Standardabweichung. Insgesamt lässt sich festhalten, dass über eine Gesamtlänge von 5,4 km der E-Modul nur geringen Streuungen unterliegt.



Abbildung 8-83: Ermittelte E-Moduln am ersten Demonstrator.



Abbildung 8-84: Ermittelte Rohdichten am ersten Demonstrator.

Am Tag der maximalen Tagesleistung wurde ein mittlerer E-Modul von 35.400 MPa mit einem Variationskoeffizienten von 2,9 % bestimmt, am Demonstrationstag ein mittlerer E-Modul von 33.700 MPa mit einem Variationskoeffizienten von 1,6 % (Abbildung 8-83). Jede Tagesleistung für sich betrachtet zeigt, dass die Ergebnisse in sehr engen Grenzen liegen. Das deutet auf eine gleichmäßige Einbauqualität an beiden Einbautagen hin.

Größere Streuungen wurden bei der Ermittlung der Zugfestigkeit festgestellt. Am Tag der maximalen Tagesleistung wurde eine gemittelte Zugfestigkeit von 2,30 MPa mit einem Variationskoeffizienten von 11,5 % bestimmt, am Demonstrationstag 2,41 MPa mit einem Variationskoeffizienten von 14,9 %. Das Minimum der Zugfestigkeit betrug 1,83 MPa. Die Anforderung an die Verbundfestigkeit f_v von \geq 1,56 MPa, ermittelt nach DIN EN 13877-2:2013-06, wurde eingehalten. Der Zugbruch fand am Tag der maximalen Einbauleistung ausschließlich im Unterbeton statt, am Demonstrationstag sowohl im Unterbeton als auch zwischen Wasch- und Unterbeton.

Bei der zweiten Demonstrationsbaustelle auf der BAB A61 zwischen AS Boppard und AS Waldesch wurde nur ein 460 m langer Teilabschnitt im Hauptfahr- und Seitenstreifen aus Beton in Plattenbauweise hergestellt. Der restliche Abschnitt wurde als durchgehend bewehrte Betondecke ausgeführt.

Eine Besonderheit des Teilabschnittes in Plattenbauweise ist, dass dieser am Anfang an eine Konstruktion mit Asphaltoberbau anschließt und dadurch in der Betonfahrbahn ein Endbereich entsteht. Für den Abbau der Längskräfte ist es daher erforderlich, die Verschiebungen in den Endbereich zuzulassen, was durch den Einbau von Raumfugen realisiert wird. Bei der Herstellung eines Endbereichs wird bis zur Asphaltbefestigung gefertigt, die an die Raumfugen angrenzende Plattenreihe zurückgebaut, die Raumfugen hergestellt und die Plattenreihe im Handeinbau ausgeführt. Der Arbeitsschritt "Fertigung bis zur Asphaltbefestigung" impliziert, dass dieser Bereich mit einer gleichbleibenden Betonqualität und einer gleichmäßigen Einbauqualität hergestellt ist. In Folge dessen wurden für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen aus diesem Bereich Betonteile ausgebaut (Abbildung 8-85).



Abbildung 8-85: Raumfugenfeld und ausgebaute Betonteile.

Der Teilabschnitt wurde einschichtig/zweilagig ausgeführt. Die Verdichtung der ersten Lage erfolgte mit Innenrüttlern, die zweite Lage mit sogenannten T-Rüttlern. An der Schnittfläche eines Betonteils war ein Basalt als grobe Gesteinskörnung zu erkennen. Größere Gesteinskörner waren über die gesamte Deckendicke gleichmäßig verteilt. Das Größtkorn betrug 22 mm. Das Betongefüge war dicht und fest (Abbildung 8-86).



Abbildung 8-86: Schnittfläche an einem Betonteil, längs zur Betonierrichtung.

Um die Prüfstreuungen im Raumfugenfeld so gering wie möglich zu halten, wurde die Entnahme von Betonbohrkernen nochmals auf einen Bereich von 0,80 m x 1,20 m eingegrenzt (Abbildung 8-87). Die Bohrkernentnahme wurde letztlich am Betonteil mit der Kennzeichnung 8 vorgenommen (Abbildung 8-85, linkes Bild).



Abbildung 8-87: Betonteil mit der Kennzeichnung 8 (vgl. Abbildung 8-85, linkes Bild) nach der Entnahme von Bohrkernen.

Es wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm entnommen. Durch die Wahl zweier verschiedener Durchmesser sollte auch dem Einfluss der Probenkörpergröße bei der Ermittlung mechanischer Betoneigenschaften im Straßenbau nachgegangen werden. An den Bohrkernen wurde der dyn. und stat. E-Modul, die zentrische Zugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Druckfestigkeit bestimmt.

Aus Tabelle 8.4 lässt sich folgendes ableiten: Bei einem Bohrkerndurchmesser von 100 mm (BK100) entspricht der statische E-Modul rd. 94 % und bei einem BK150 rd. 92 % des dynamischen E-Moduls. Die gewählten Durchmesser von 100 mm und 150 sind hinsichtlich der Ergebnisse zum dyn. E-Modul und stat. E-Modul vernachlässigbar.

Tabelle 8.4: Auswertung des dynamischen und statischen E-Moduls unter Angabe von Bohrkerndurchmesser, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).

		dyn. E-	Modul	stat. E-Modul				
Bohrkern-	MW	Stabw.	Var.	n	MW	Stabw.	Var.	n
durchmesser	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]
100 mm	47.300	0,9	1,93	25	44.600	2,5	5,6	13
150 mm	47.000	0,6	1,32	11	43.500	2,0	4,5	6

Die zentrische Zugfestigkeit wurde im Mittel zu 2,1 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 7,9 % ermittelt. Die zur Zugfestigkeit korrespondierende Spaltzugfestigkeit (vgl. Abbildung 8-88) beträgt im Mittel 3,9 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 10,8 %. Die Spaltzugfestigkeit sowie die Streuungen, ermittelt an Bohrkernen mit einem Durchmesser 150 mm (DIN EN 12390-6:2010-09), sind vergleichbar mit der Spaltzugfestigkeit ermittelt an Bohrkernscheiben (TP B-StB, Teil 3.1.05).

Tabelle 8.5: Auswertung der zentrischen Zugfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit unter Angabe von Bohrkerndurchmesser, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).

		zentrische Z	ugfestigkeit	Spaltzugfestigkeit				
Bohrkern-	MW	Stabw.	Var.	n	MW	Stabw.	Var.	n
durchmesser	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]
100 mm	2,1	0,2	7,9	6	3,9	0,4	10,8	6
150 mm		nicht be	stimmt		3,9	0,4	9,5	5



Abbildung 8-88: Ermittlung zu der zentrischen Zugfestigkeit korrespondierenden Spaltzugfestigkeit, ermittelt an Bohrkernscheiben.

In Tabelle 8.6 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit zusammengestellt. Diese wurden an Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und einem Verhältnis von Länge/Durchmesser = 1 an der oberen und unteren Randfaser bestimmt. Es zeigt sich, dass die Druckfestigkeit an der oberen Randfaser mit 56,2 MPa deutlich geringer ist als die Druckfestigkeit von 70,1 MPa an der unteren Randfaser. Der Frage, inwieweit die Verdichtung und die Auflast auf die Druckfestigkeit im unteren Bereich einer Fahrbahndecke einen Einfluss hat, sollte in Zukunft nachgegangen werden.

Tabelle 8.6: Auswertung der Druckfestigkeit, ermittelt an der oberen und unteren Randfaser unter Angabe von Bohrkerndurchmesser, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).

	Dr	uckfestigkeit, d	obere Randfa	ser	Druckfestigkeit, untere Randfaser			
Bohrkern-	MW	Stabw.	Var.	n	MW	Stabw.	Var.	n
durchmesser	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]
100 mm	56,2	1,9	3,4	12	70,1	5,4	7,7	12

Folgende Schlussfolgerungen können aus den beiden Demonstrationsstrecken abgeleitet werden:

- Beim ersten Demonstrator führte die optimierte Mischprozessführung durch die Erhöhung der Mischerdrehzahl mittels Anpassung des Übersetzungsverhältnisses der Riemenscheiben im Antriebsstrang des Mischers zu einer um 50 % erhöhten Ausstoßleistung des Mischers bei gleichzeitiger Verringerung der Mischzeit.
- Bei vergleichbarem Betoneinbau eines Betons aus einer optimierten und einer konventionellen Mischprozessführung, wurden hinsichtlich mechanischer Betoneigenschaften keine signifikanten Verbesserungen festgestellt. In beiden Fällen gilt, dass für eine hochwertige und gleichmäßig hergestellte Betonfahrbahndecke die Streuungen bei auf Druck belasteten Prüfkörpern ≤ 5 % und bei auf Zug belasteten Probekörpern ≤ 10 % betragen sollte.
- Bei der Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit findet der Bruch immer an der schwächsten Stelle statt. Dieser ist bei zweischichtig hergestellten Betonen im Unter- oder im Oberbeton anzutreffen oder auch im Verbund zwischen den zwei Schichten. Bei einschichtig/zweilagig hergestellten Betondecken ist ein Bruch ebenfalls in der oberen und unteren Schicht wie auch zwischen den zwei nacheinander eingebauten Lagen möglich.

- Ergebnisse von auf Zug geprüften Prüfkörper streuen stärker als auf Druck geprüfte Prüfkörper. Jegliche Störstelle, ob im Gesteinskorn, in der Zementsteinmatrix oder im Verbund, wirkt sich im zentrischen Zugversuch stärker aus als im Druckversuch. Trotzdem sind vergleichsweise niedrige Streuungen von unter 10 % bei hochwertig und gleichmäßig hergestellten Betonfahrbahndecken möglich. Bei Streuungen größer 10 %, sollte die minimalste Zugfestigkeit ≥ 1,56 MPa betragen. Diese Mindestanforderung entspricht der Verbundfestigkeit fv ermittelt nach DIN EN 13877-2:2013-06.
- Bei einschichtig/zweilagig hergestellten Betondecken zeigte sich, dass die Druckfestigkeit in der unteren Lage größer ist als in der oberen. Sollte sich dieser Trend bestätigen wäre es perspektivisch möglich, bei einschichtig/zweilagigen ausgeführten Betondecken den Zementgehalt in der unteren Lage um 20 kg/m³ zu reduzieren, um somit einen nachhaltigen Beitrag zur CO₂-Einsparung beim Fahrbahndeckenbau zu leisten.

Neben den Festbetonprüfungen wurde bei der zweiten Demonstratorstrecke auch das entwickelte WRF-Messgerät im der Praxiseinsatz getestet. Da hier keine Oberflächenbearbeitung vorgesehen war, wurde der Schwerpunkt auf den Fugenschnitt gelegt.



Abbildung 8-89: WRF-Messung an der Demonstratorstrecke

Die WRF-Messungen wurden an der Betonplatte Nr. 61 durchgeführt (Abbildung 8-89). Die Zwischenmedien waren materialalternierend in unterschiedlichen Abständen von ca. 40 bis 140 cm über die Betonplatte verteilt, je nach lokalem Oberflächenzustand. Die Position der Zwischenmedien (je 4 x 4 cm groß, ca. 5 mm in die Oberfläche eingedrückt) befand sich auf dem zukünftigen Standstreifen, somit außerhalb der regelmäßig befahrenen Strecke. Diese Position der Zwischenmedien wurde unter gewählt, da die Messstellen durch die Baufahrzeuge nicht beschädigt werden und diese auch nicht behindern sollten. Ebenso sollten Eindellungen in der Fahrbahnoberfläche vermieden wurden, um den Fahrkomfort und gegebenenfalls die Dauerhaftigkeit nicht zu vermindern. Die Zwischenmedien wurden nach dem Aufbringen des Nachbehandlungsmittels auf dieses aufgesetzt.

Im Rahmen der Versuche wurden Probeschnitte durch den Projektpartner OAT auf der zugewiesenen Betonplatte durchgeführt, um die Messergebnisse der Ultraschalluntersuchungen mit den Probeschnitten vergleichen zu können und um Rückschlüsse auf den optimalen Schnittzeitpunkt zu ziehen. Der erste Probeschnitt (Abbildung 8-90, Schnitt Nr. 1) wurde um 14:20 Uhr durchgeführt, fast 6 Stunden nach Betonierbeginn. Nach Einschätzung der Bauleitung der Firma OAT ist frühestens ab ca. 7 Stunden nach dem Betonieren bei entsprechenden Außentemperaturen ein möglicher Schnittzeitpunkt. Ausgehend von dieser Aussage war der erste Probeschnitt, der absichtlich bereits nach etwa 6 Stunden durchgeführt wurde, deutlich zu früh erfolgt. Durch die wechselhaften Außentemperaturen war schnell klar, dass ein deutlich späterer Schnittzeitpunkt gewählt werden musste. Aus diesem Grund wurde bis 18:29 Uhr (nach ca. 12 Stunden; Nr. 6) etwa jede Stunde ein weiterer Schnitt durchgeführt. Danach wurden die Probeschnitte im Takt von etwa 30 Minuten durchgeführt.



Abbildung 8-90: Erster (nach etwa 8 Stunden), zweiter (nach etwa 9 Stunden), dritter (nach etwa 10 Stunden), vierter (nach etwa 10 Stunden) und fünfter Probeschnitt (nach etwa 11 Stunden)



Abbildung 8-91: Sechster (nach etwa 12 Stunden), siebter (nach etwa 12,5 Stunden) und achter Probeschnitt (nach etwa 13 Stunden)

Aufgrund des Erscheinungsbildes des siebten Probeschnittes um 18:52 Uhr (nach etwa 12,5 Stunden, siehe Abbildung 8-91) mit sehr geringen Ausbrüchen, wurden die ersten Querfugen am Beginn der Demonstratorstrecke durch OAT hergestellt. Die Probeschnitte wurde bis ca. 14,5 Stunden nach Beginn der Betonage ausgeführt, sowie ein weiterer Probeschnitt am nächsten Morgen nach gut 25 Stunden.

Zwischen den ersten drei Schnitten war keine große Veränderung in der Intensität der Ausbrüche zu erkennen. Bei allen drei Schnitten traten große Ausbrüche auf, die darauf hinwiesen, dass der optimale Schnittzeitpunkt noch nicht erreicht war. Beim vierten Schnitt nach fast 10 Stunden war eine deutliche Verringerung der Ausbrüche an der Schnittkante zu sehen. Auch beim sechsten Probeschnitt waren noch Ausbrüche zu erkennen. Der siebte Schnitt nach 12,5 Stunden wurde aufgrund seines Erscheinungsbildes als optimaler Schnittzeitpunkt bestimmt, da hier die Ausbrüche innerhalb der Grenzen waren, die durch das spätere Aufweiten der Fugen tolerierbar sind.



Abbildung 8-92: WRF-Messung mit Magnesium als Zwischenmedium. Rot: optimaler Schnittzeitpunkt nach 12,5 Stunden auf Grundlage der Probeschnitte.

Abbildung 8-92 zeigt die Ergebnisse der WRF-Messung mit Ultraschall bei vier Zwischenmedien aus Magnesium. Diese Messungen werden als Entwicklung des WRF-Werts über die Zeit bzw. des Alters der Probe dargestellt. Im gezeigten Messzeitraum ist ein kontinuierlicher Anstieg der Messergebnisse bis etwa 10,5 Stunden zu sehen, worauf ein Plateau auf niedrigerer Ebene folgt, mit einem Minimum bei ca. 11,5 Stunden. Insgesamt liegen die Messwerte sehr hoch. Es wird vermutet, dass das Aufsetzen der Zwischenmedien auf das Nachbehandlungsmittel anstelle auf den Beton ursächlich ist. In den zeitlich nachfolgenden Versuchen am Experimentalprüfstand wurde daher der Bereich der Zwischenmedien lokal vom Aufbringen des Nachbehandlungsmittels ausgespart.

9 ERFAHRUNGEN MIT DEN ANGEWENDETEN METHODEN, VERFAHREN UND WERKZEUGEN

In einem ersten Schritt wurden insbesondere Literaturrecherchen durchgeführt sowie erste Ansätze zum Einsatz innovativer Methoden, Verfahren und Werkzeuge validiert und evaluiert. Dies zeigte auf, dass in vielen Bereichen bereits Messtechnik eingesetzt wird, um die einzelnen Maschinen intern zu überwachen. Jedoch fehlt oft ein Datenaustausch und Schnittstellen über die Prozessgrenze hinaus. In diesem Zusammenhang bildet eine digitale Vernetzung, welche im Zuge dieses Projekts umgesetzt werden soll und stellenweise auf der ersten Baustelle erprobt wurde, ein großes Potential. Dafür ist es notwendig bestehende Signale und Messungen sinnvoll aufzubereiten. Dies beinhaltet z.B. eine gute Schnittstellendefinition, Synchronisation und Übertragung. Durch das Projektkonsortium ist eine gute Datenbasis für die Mischanlage, den Fertiger, die Nachbearbeitung, Oberflächenanalyse sowie Frisch- und Festbetonuntersuchungen vorhanden.

Anhand dieser nun zur Verfügung stehenden Daten, welche vom Umfang deutlich über dem üblichen Maß hinaus liegen, können jetzt Ursachen für Unzulänglichkeiten detektiert werden. Problematisch für die Auswertung sind die verschiedenen Systeme zur Verortung der Messergebnisse wie z.B.:

- Baustellenstationierung mit Baustellenkilometrierung (üblich Bauanfang = Station 0+000)
- Bauvermessung zur Absteckung des Leitdrahtes: mit UTM-Lagekoordinaten und DHHN92-Höhen.
- Fahrspur des Gleitschalungsfertigers
- Messspur des Planographens: Angabe der Fahrspur sowie Startpunkt über Aufzeichnung der Autobahnkilometrierung. Längenabweichung durch Toleranz bei Streckenmessung mittels integriertem Messrad bzw. Abweichungen durch das Umfahren von Hinternissen
- Aufnahme der Oberfläche durch Lehmann + Partner

Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass der Transport oftmals nur teilweise bzw. nicht überwacht wird. In diesem Zusammenhang erleichtert die Anwendung einer Logistiksoftware wie z. B. BPO den Informationsfluss zwischen der Mischanlage und der Baustelle. Dadurch, dass die Daten für den Versuch jedoch manuell mit zusätzlichem Personal an der Mischanlage eingegeben werden müssen, stehen dem zunächst einmal wirtschaftliche Nachteile entgegen. Hinzu kommt, dass sich auf einem Fahrzeug immer mehrere Mischchargen, teilweise auch von mehreren Mischanlagen befinden. Somit müssen zuerst diese Chargen einem einzelnen Fahrzeug zugeordnet werden. Um zusätzlichen Aufwand für den Mischmeister bzw. Fehler bei der manuellen Erfassung zu vermeiden, ist hierfür eine Automatisierung erforderlich. Auf der Baustelle muss die Ankunft des Fahrzeugs, der Beginn und das Ende der Entladung registriert und der jeweiligen Station zugeordnet werden. Dies bedeutet zunächst wieder einmal einen erhöhten Personalaufwand.

Im Bereich des Asphaltbaus wird die automatische Erfassung der Lieferungen im Programm BPO über das Verwiegesystem bei einer zunehmenden Anzahl an Mischwerken umgesetzt. Hierdurch wird für den Einsatz der Software nur ein überschaubarer Mehraufwand benötigt, so dass diese durch die Vorteile des Informationsaustauschs in Echtzeit aufgewogen werden.

Zur Erzielung eines gleichmäßigen Einbauergebnisses und einem konstanten Luftporengehalt ist es unabdingbar, die Frischbetonkonsistenz sehr exakt steuern zu können. Hierzu müssen die variierenden Ausgangswassergehalte der eingesetzten Gesteinskörnungen fortlaufend erfasst und darauf die Dosierung des erforderlichen Zugabewassers dementsprechend angepasst werden. Die bestehende Messtechnik wird weiterentwickelt und durch alternative Prüfverfahren wie z. B. Radartechnik, ergänzt. Im Bereich der Frischbetonuntersuchungen sind viele Messverfahren bereits seit langem im Einsatz. Dadurch werden die Verfahren meist manuell und nicht automatisiert durchgeführt. Dies führt zu Abweichungen bei der Durchführung der Versuche sowie mitunter zu subjektiv gewonnenen Ergebnissen. Durch erste online Formulare konnten diese manuellen Prüf- und Dokumentationsprozesse digital in eine ganzheitliche Erfassung des Baustellenzustands integriert werden und stehen somit auch prozesschrittübergreifend den Nutzern des Prozessleitsystems zur Verfügung. Hiermit konnten trotz des geringen implementierten Funktionsumfangs bereits die ersten Potentiale validiert werden und es konnte beim Baustellenpersonal großes Interesse an einer solchen Herangehensweise geweckt werden. Das Potential zeichnet sich besonders im Bereich der Baustellendokumentation und -kommunikation ab.

Für die Optimierung des Antriebsstrangs für den Doppelwellentechnikumsmischer wird ein sogenanntes Schwerlastservogetriebe konzeptioniert, konstruiert und gebaut. Die Konstruktion zeichnet sich durch eine vergleichsweise verwindungssteife Ausführung des Gehäuses und der Lagerung aus. Die Getriebe sind bei einem ausgedehnten Leerlauftest, auch bei erwärmten Komponenten, gut gelaufen. Zusätzlich zur Drehmomenterfassung über das Reaktionsmoment mittels einer Kraftmessdose und die Motorleistung soll das Drehmoment über einen magnetoresistiven Sensor direkt an der Abtriebswelle detektiert werden. Die Funktion kann am Getriebe bisher noch nicht getestet werden, aus diesem Grund werden erste Erfahrungen mittels eins Funktionstests an einem statischen Versuchsträger gesammelt.

10 AKZEPTANZBEWERTUNG

Zum aktuellen Zeitpunkt der Berichterstattung ist die Akzeptanz und das Feedback der beteiligten Unternehmen und Institutionen durchweg positiv. Bereits im laufenden Vorhaben konnten diverse Publikationen in verschiedenen Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Zudem haben einige Projektbeteiligte im Rahmen öffentlicher Vorträge über das Vorhaben selbst und die Ziele des Vorhabens berichtet. Auch konnten erste Ergebnisse vorgestellt werden. Insbesondere ist es gelungen, im Rahmen des 3. Forschungskolloquiums Betonstraßenbau (Initiator und Veranstalter: Bundesanstalt für Straßenwesen), das an der Universität Stuttgart veranstaltet wurde, einer großen Teilnehmerzahl über drei Tage hinweg die Motivation und die Ziele des Vorhabens Betonfahrbahn 4.0 vorzustellen. Neben Übersichtsvorträgen konnten alle Projektpartner aus ihren jeweiligen Arbeiten zu berichten. Zudem wurden alle im Vorhaben analysierten und im Fokus stehenden Aspekte der miteinander vernetzten Prozessschritte der Fahrbahnherstellung auch mit dem Charakter eines Workshops mit den interessierten Tagungsteilnehmern an den diversen Baumaschinen der Prozesskette erläutert und diskutiert, um die Potenziale einer digitalisierten Vernetzung aller Teilschritte aufzuzeigen. Die im Februar 2019 durchgeführte Veranstaltung wurde vom gesamten Projektteam mit großem Engagement getragen. Dank im Nachgang allen Projektpartnern, die mit großen realen Baumaschinen (Fertiger, Grindingmaschine, IWB-Technikumsmischanlage) und vielen weiteren kleineren Geräten und Messverfahren zur Vermessung der Fahrbahnoberfläche bzw. zur Charakterisierung der frischen und festen Fahrbahnbetone keine Kosten und Mühen gescheut haben, den Teilnehmern an realen Systemen die Vorhabenideen verdeutlichen zu können. Auch die beiden Abendveranstaltungen, hier gilt dem Team der MPA in der Abteilung Mineralische Baustoffe großer Dank, boten umfassende Möglichkeiten, dass die Branche dem Betonfahrbahnbau förderliche Gespräche führen konnte.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass anlässlich des 3. Forschungskolloquiums Betonstraßenbau eine hohe Akzeptanz und ein vielfältiges Feedback dem Verbundforschungsvorhaben zuerkannt wurde. Alle Teilnehmer haben ihr großes Interesse an den Arbeiten von "Betonfahrbahn 4.0" zum Ausdruck gebracht und zeigten großes Interesse, zum Abschluss des Vorhabens in einem weiteren Forschungskolloquium die Ergebnisse des Vorhabens präsentiert zu bekommen.

Die Teilnehmer des Kolloquiums umfassten:

- Straßenbauverwaltungen
- Bauwirtschaft
- Baumaschinenhersteller
- Politik
- Gesellschaft
- Wissenschaft

In weiteren Veranstaltungen und Publikationen werden die Verbundpartner als Ganzes wie auch in ihrer jeweiligen spezifischen Fachwelt über das Verbundvorhaben berichten. Letztlich gilt es, bis zum Projektende die Vielfalt aller Untersuchungsergebnisse zu validieren und zu evaluieren, um den Forschungs- und Entwicklungsprozess hin zur *Betonfahrbahn 4.0* systematisch zu unterstützen. Auch in weiteren Präsentationen und Veröffentlichungen wird aus dem Vorhaben informiert. Aktuell sind Berichte zum Status Quo der Straßeninfrastruktur geplant. Zudem werden alle von außen dem Vorhaben gegebenen Impulse aufgegriffen, um eine bedarfs- und praxisorientierte Ausrichtung der Forschung in "Betonfahrbahn 4.0" sicherzustellen.

11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die bisherigen Arbeiten und Analysen im Rahmen des Forschungsprojektes *Betonfahrbahn 4.0* verdeutlichen die Notwendigkeit, innovative Methoden und Konzepte vom Labormaßstab in Vorgehensweisen für die reale Baupraxis zu übertragen. Diese Transformationen können nur durch praxisrelevante und ganzheitliche Untersuchungen und Entwicklungen durchgeführt werden. In diesem Kontext müssen alle Teilschritte bei der Betonfahrbahnherstellung von der Planung der Baumaßnahme bis hin zur Qualitätssicherung der fertigen Fahrbahn berücksichtigt werden. Die Werkstoffeigenschaften, Dauerhaftigkeit sowie die Qualität der Fahrbahnbetone sind dabei, neben der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe, zentral von den Teilprozessen der Frischbetonherstellung in der Mischanlage, vom Fördern zur Baustelle, über den Einbau der Betone mit dem Fertiger bis hin zur Nachbearbeitung der Fahrbahnoberfläche abhängig.

Durch das tatkräftige Mitwirken aller Partner konnten die Baustellenanalysen abgeschlossen werden. Bei den erweiterten Messkampagnen zusammen mit allen Projektpartnern sowie den Einzelanalysen in den entsprechenden Teilbereichen wurde der Ist-Stand verschiedener Baumaßnahmen dokumentiert und ausgewertet. Daraus konnten in den Analysen schon wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden. Hierzu zählen nicht nur wertvolle Einblicke, wie beispielsweise aktuelle Prozessschwankungen, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der eingesetzten Messverfahren, Komplikationen in der Abstimmung und Überwachung der getrennten Logistikkette, etc., sondern auch das Entwickeln neuer Analysemethoden und weiterführende Ansätze für neue innovative Verfahren und Methoden, das Ableiten vermeintlicher Qualitätsparameter und das Potential innovativer Methoden für den baupraktischen Einsatz abzuschätzen. Durch die detaillierte Baustellenanalyse konnte eine ganzheitliche Datenbasis bei gleichzeitigem verbessertem Prozessverständnis erstellt werden, welche für einen sinnvollen Aufbau einer digitalen Vernetzung unabdingbar ist. Dabei zeigte sich, dass durch das Zusammenführen der Wissensgrundlage und Herangehensweise verschiedener operativer und organisatorischer Ebenen und Domänen ein tiefgehendes Verständnis für die Komplexität und Herausforderungen auf einer Baustelle gewonnen werden und Prozesse bzw. Abstimmungen teilweise bereits verbessert werden konnten. Trotz der nachgewiesenen Schwankungen in den umfangreichen und detaillierten Messkampagnen, wurde bei allen begleiteten Maßnahmen normgerecht mit hinreichender Genauigkeit eingebaut.

Weiter zeigten diese realen Untersuchungen, dass einige Ziele im Projekt neu definiert werden und somit eine Mittelumwidmung durchgeführt werden musste. Es wurde in 2018 zur Sicherstellung der Skalierbarkeit vom Labor bis hin zur baupraktischen Anwendung das entsprechende Arbeitspaket um einen zusätzlichen Labormischer nach gleichem Mischprinzip und einem ähnlichen Antriebsstrang erweitert. Weiter wurden durch die Baustellenanalysen und einer Machbarkeitsstudie zum Experimentalprüfstand gezeigt, dass das beantragte Konzept nicht hinreichend die Realität darstellt und daher das Konzept angepasst werden musste. Bei der Konzeption des Experimentalprüfstandes konnten durch die Industriepartner des ISYS und Partner im Forschungsvorhaben die Kosten durch Spenden reduziert werden und ermöglichten somit erst eine kostenneutrale Realisierung der Erweiterung.

Parallel zu den Analysen wurden die neu hinzu gekommenen Labormischer mit einem optimierten Antriebsstrang aufgebaut und dazu das Steuerungssystem neu entwickelt. Auf dem Gelände des IWB wurde die 1.25 m³ Technikumsmischanlage erfolgreich aufgebaut. Ebenfalls wurde am Technikum in Aachen durch den Aufbau und detaillierte Versuchsreihen mit Referenzprofilen sowie im realen Einbau ein neuer Prüfstand zur Ebenheitsvermessung entwickelt. Dabei wurde eine Methode zur Ebenheitsbestimmung des Betons während des Einbaus entwickelt und im Vergleich der Messtechniken von Wirtgen und L+P validiert. Der Arbeitsschwerpunkt der digitalen Vernetzung der Baustellenteilnehmer konnte durch das Entwerfen eines Konzeptes für den zentralen Leitstand sowie das Definieren der ersten Schnittstellen zur Maschinenebene erfolgreich weiter vorangetrieben und konzeptionell evaluiert werden. Verschiedene Abstraktionsebenen bei der Modellierung der Baustelle, startend mit einer Übersicht bis hin zu Detailsimulationen wie bspw. des Aushärtevorgangs, ermöglichen eine zielgerichtete und ressourcenschonende Integration in das digitale Prozessleitsystem. Durch eine auf Basis der Baustellenanalyse entworfene Datenmodellierung und -synchronisation konnte eine Applikationsplattform aufgebaut sowie Schnittstellen zu den Projektpartnern bzw. deren Maschinen definiert werden. Eine erste, wenn auch noch vereinfachte, Evaluierung der so entworfenen Konzepte konnte an der Baustelle Wittlich live erprobt und in enger Absprache mit den Beteiligten angepasst werden. Der Einsatz solcher digitaler Schnittstellen stieß trotz kleinerer Probleme z.B. mit der Internetverfügbarkeit auf gute Akzeptanz. Weiter wurde die Schnittstelle zwischen dem Gleitschalungsfertiger und dem zentralen Leitstand sowie die hierfür notwendige Logik, die die Maschinendaten verarbeitet, in großen Teilen umgesetzt. Erste Tests an der Prüfstandsmaschine in Aachen könnten erfolgreich durchgeführt. Ebenfalls konnte die hierfür benötigte Kernlogik der Ebenheitsbestimmung, die am Technikum in Aachen entwickelt wurde, weitestgehend validiert und integriert werden.

Mit einem direkten Antrieb der Mischergetriebe, einer verwindungssteifen Getriebestruktur und einer Messung des aufgewendeten Drehmoments, möglichst nahe am Mischpaddel, kann der Mischprozess und der damit verbundene Einfluss auf den Beton genauer detektiert werden. Dafür wird ein sogenanntes Schwerlastservogetriebe konzeptioniert, konstruiert und gebaut. Die Messung des Drehmoments soll an drei verschiedenen Stellen redundant erfolgen über die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung, über das Reaktionsmoment am Getriebegehäuse und möglichst nah am Mischpaddel an der Getriebeabtriebswelle.

Durch die gestiegene Komplexität sowie die organisatorischen Hürden bei der Umrüstung der Anlagen ist 2019 eine kostenneutrale Projektverlängerung angegangen worden. Diese ermöglicht noch detailliertere und zielgerichtete Analysen um die Methoden und Messsysteme auf den Einsatz in einer realen Baustellenumgebung vorzubereiten.

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden durch L+P zur Qualitätssicherung Ebenheitsmessungen und -analysen auf Straßen- wie auch Flugverkehrsflächen durchgeführt. Dies betraf vorrangig in Betonbauweise ausgeführten Decken aber auch deren Unterlage. Die hierfür von L+P eingesetzten Erfassungssysteme können Ebenheitsdaten sowohl mit konventionellen zertifizierte Erfassungsmethoden (HRM-Prinzip) als auch auf Basis modernster dreidimensionaler Laserscanning Ansätze schnellfahrend und berührungslos erfassen. Zur Analyse der erfassten Ebenheitsdaten wurden mit dem Bewerteten Längsprofil moderne Ebenheitsindikatoren verwendet, die auch fahrdynamische Aspekte besser berücksichtigen können, als dass mit konventionellen berührenden Methoden möglich ist. Darüber hinaus ermöglichten die flächenhaft erfassten Oberflächeninformationen der Laserscans erweiterte dreidimensionale Deformationsanalysen sowie experimentelle Analysen zum Qualitätsaspekt Betoneinbaustärke (beim Vorliegen multitemporaler Datensätze).

Folgende Erkenntnisse sind bezüglich des Qualitätsaspektes Ebenheit festzuhalten:

 Ein Einfluss von Unebenheiten der Tragschicht auf die Ebenheit der Decke kann nicht nachgewiesen werden. Vielmehr korrelierten die festgestellten Unebenheiten der Decke oftmals mit fertigungsbedingten Maschinenstopps oder Tagesanschlüssen. Die Interpretation der multitemporalen 3D-Daten legen jedoch den Schluss nah, dass Unebenheiten in der Unterlage lokale Schwankungen der Betoneinbaustärke bewirken. Daraus können potentielle Schwächezonen resultieren, die bei Belastung einen Einfluss auf die Lebensdauer der Decke haben können.

- Erwartungsgemäß war eine Ebenheitsmessung mit klassischen berührungslosen Verfahren auf mit Grinding/Grooving nachbehandelten Oberflächen ist nicht zuverlässig möglich, da das HRM-Messprinzip durch die charakteristische Oberflächengestaltung (Stege und Rillen) verletzt ist. Dagegen lieferte die Ebenheitsmessung auf Basis des 3D-Modells plausible Ergebnisse. Die Analyse dieser Ebenheitsdaten legt nahe, dass punktuelle Unebenheiten der Decke, wie sie an fertigungsbedingten Maschinenstopps oder Tagesanschlüssen vorkommen, durch die Grinding/Grooving-Behandlung eliminiert werden können. Im Allgemeinen kann eine Grinding/Grooving-Behandlung die Längsebenheit signifikant verbessern.
- Die Verwendung moderner Ebenheitsindikatoren führte zu einer realistischeren Bewertung der Ebenheitsqualität. Faktisch komfortbeeinträchtigende Unebenheiten, die im Zuge klassischer berührender Ebenheitsabnahmemessung unauffällig sind, können mit dem Bewerteten Längsprofil bzw. dem International Roughness Index aufgezeigt werden.

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Auszug aus dem Lastenheft – hier Auszug für die Analyse der Mischanlage und des Fertigers	16
Abbildung 2-2: Mögliche Messstellen zur Feststellung der Ebenheit in Bezug auf die Fertigungsschritte des Fahrbahnbaus	20
Abbildung 3-1: Darstellung einer mobilen Betonmischanlage – Ausführung als Doppelwellenmischanlage mit Taschen- siloanlage mit 6 Kammern (Quelle: Fa. Schnorpfeil)	22
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Doppelwellenzwangsmischers (links), Feuchtemesssensor (rechts) (Quelle: Firma Liebherr)	22
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Doppelwellenzwangsmischers (links), Feuchtemesssensor (rechts) (Quelle: Firma Liebherr)	25
Abbildung 3-4: Potenziale innovativer Mischprozessführung – Spielzeitplan (links), Feststellung des Mischendes (rechts)	26
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Prozesskette "Betonherstellung", wie sie im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" zur Anwendung und erprobt werden soll (Quelle: IWB)	28
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Prozesskette "Betonherstellung", wie sie im Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" zur Anwendung und erprobt werden soll (Quelle: IWB)	30
Abbildung 3-7: Hochleistungsbeton mit unzureichender Durchmischung und Granalienbildung bei einem Einbauversuch (links), Detailbild Granalienbildung (rechts)	31
Abbildung 3-8:: Einbauprozess Betonfahrbahndecken (links); unzureichende Grünstandfestigkeit beim Einbau (rechts)	32
Abbildung 3-9: Bildmaterial aus [Skarabis 2020] zur Wachbetonbauweise und zum Grindingverfahren links - Ausbürsten des Oberflächenmörtels (oben), Waschbetontextur (unten) rechts - Grindingmaschine (oben), Grindingtextur (unten)	36
Abbildung 3-10: Mobile Laserscanning System S.T.I.E.R 3 der Firma L+P. Zwischen dem rechten Vorder- und Hinterrad befinden sich 4 nach dem HRM-Prinzip angeordnete Einzellaser zur Erfassung eines Höhenlängsprofils in der rechten Rollspur. Am Heck sind ein Oberflächenlaserscanner sowie eine hochauflösende Oberflä- chenzeilenkamera samt zugehöriger Beleuchtungseinheit montiert.	39
Abbildung 3-11: Mobile Laserscanning System I.R.I.S der Firma L+P. Im Projektkontext sind vor allem der hinten am Dachträger mittig montierte Oberflächenscanner PPS sowie der rechts daneben montierte 350° La-	41
seiscamer CPS von Bedeulung.	41
Abbildung 4-1: Obersicht über die Arbeitsschwerpunkte und die Beteiligung der Verbundpartner	42
Abbildung 5-1: Skizze der Teilnenmer, des Ablaufs und relevanter Schritte wahrend des Bauprozesses.	48
Abbildung 5-2: Verteilung Ursachen-Kategorien	49
Abbildung 5-3: Auswirkung Anlagenart auf Einbautag	50
Abbildung 5-4: Auswirkung Art der Dosierung auf Einbautag	50
Abbildung 5-5: Auswirkung Transportfanrzeug auf Einbautag	51
Abbildung 5-6: Auswirkung Lufttemperatur auf Einbautag	51
Abbildung 5-7: Auswirkung Lufttemperatur auf Konsistenz	52
Abbildung 5-8: Auswirkung Betontemperatur auf Einbautag	52
Abbildung 5-9: Auswirkung Betontemperatur auf Konsistenz	53
Abbildung 5-10: Auswirkung Konsistenz auf Konsistenzschwankungen	53
Abbildung 5-11: Lagerung der Ausgangsstoffe ohne (links) und mit Bewässerung (rechts)	55
Abbildung 5-12: Vereinfachte schematische Darstellung der Kraftwandlungskette	57
Abbildung 5-13: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 (oben) und Mischers 2 (unten) bei der Baustelle KW I	
für den C1-Beton	59
Abbildung 5-14: Ubersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle KW I für den F2-Beton (Handfeld)	60
Abbildung 5-15: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle KW II für den C1-Beton (oben) und F2-Beton (unten)	60
Abbildung 5-16: Übersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle Wil für den Unterbeton (oben) und Oberbeton (unten)	61

Abbildung 5-17: Ü Oberbeton (ur	bersicht der Tagesleistung des Mischers 1 bei der Baustelle Will für den Unterbeton (oben) und nten)
Abbildung 5-18: V	ergleich der Standardabweichungen für KW I und KW II (C1)
Abbildung 5-19: V	ergleich der Standardabweichungen für (Wi I) und (Wi II) (UB)
Abbildung 5-20: V	ergleich der Standardabweichungen für (Wi I) und (Wi II) (OB)
Abbildung 5-21: 27.06.2018)	Exemplarische Kenngrößen und Ablauf einer "idealen" Mischung (Mischer 1, Köln-Wahn,
Abbildung 5-22: E 27.06.2018)	xemplarische Kenngrößen und Ablauf einer Mischung mit Nachdosierung (Mischer 1, Köln-Wahn,
Abbildung 5-23: E (Mischer 1, Kö	Exemplarische Kenngrößen und Ablauf einer Mischung mit Wartezeit aufgrund Transportkette In-Wahn, 27.06.2018)
Abbildung 5-24: Ü	bersicht über Produktionsleistung an einem exemplarischen Tag
Abbildung 5-25: H	istogramme zur Verteilung der Gesamtchargengröße für Köln-Wahn (links) und Wittlich (rechts)
Abbildung 5-26: V Mischer 1 (link	/erteilung der Chargengröße einer Mischung für den C1-Beton der Baustelle KW I, aufgeteilt in (s) und Mischer 2 (rechts)
Abbildung 5-27: V Mischer 1 (link	'erteilung der Chargengröße einer Mischung für den C1-Beton der Baustelle KW II, aufgeteilt in s) und Mischer 2 (rechts)
Abbildung 5-28: V jeweils für Mis	erteilung der Chargengröße einer Mischung für den UB (links) und OB (rechts) der Baustelle Wi I , cher 1
Abbildung 5-29: V jeweils für Mis	erteilung der Chargengröße einer Mischung für den UB (links) und OB (rechts) der Baustelle Wi II , cher 1
Abbildung 5-30: H	istogramme der Einwaagen Sand und Kies des C1 Betons für (KW I) und Mischer 1
Abbildung 5-31: H	istogramme der Einwaagen Wasser und Zement des C1 Betons für (KW I) und Mischer 1
Abbildung 5-32: H KW I und Misc	listogramme der Einwaagen Luftporenbildner (links) und Verzögerer (rechts) des C1 Betons für her 1
Abbildung 5-33: H II und Mischer	istogramme der Einwaagen Luftporenbildner (links) und Verzögerer (rechts) des C1 Betons für KW 2
Abbildung 5-34: H	istogramm des Fließmittels für den OB in (Wi I)
Abbildung 5-35: W	/asserdosierung in (a) KW I, (b) KW II, (c) Wi I OB, (d) Wi II OB, (e) Wi I UB und (f) Wi II UB
Abbildung 5-36: W	/assernachdosierung in KW I für Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts)
Abbildung 5-37: W	/assernachdosierung in KW II für Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts)
Abbildung 5-38: W	/assernachdosierung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für Unterbeton (Mischer 1)
Abbildung 5-39: W	/assernachdosierung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für Oberbeton (Mischer 1)
Abbildung 5-40: A	usschnitt aus den Zeitreihendaten eines Mischtages der Baustelle Köln-Wahn
Abbildung 5-41: Ü mit	bersicht über Mischerleistung eines Einbautages (27.06.2018). a) alle Mischungen, b) Mischungen Endzeit zwischen 80s und 140s (93,2% bzw. 92,4% der Kurven liegen in diesem Bereich)
Abbildung 5-42: N	1essung Antriebsleistung, Wittlich II (Links: Unterbeton C30/37C1, Rechts: Oberbeton C30/37F2)
Abbildung 5-43: K	raftaufnehmer am betrachteten DW 2,5 Mischer
Abbildung 5-44: V	ergleich von Abtriebs Leistung und durch Drehmomentsensor gemessener Leistung
Abbildung 5-45: A	symmetrie der Leistungsverteilung beim Befüllen des Mischers
Abbildung 5-46: V	ergleich der Wirkungsgrade von Drehmomenten und Wirkleistungsmessung
Abbildung 5-47: So	chlupf des Riemenantriebes in Abhängigkeit der Wirkleistung und der Betriebstemperatur
Abbildung 5-48: V alle	erteilung der Mischzeit in KW I jeweils für C1-Beton und Mischer 1. Links ist die Verteilung über Chargen aufgetragen und rechts beschränkt auf die Chargen mit einer Mischdauer von
weniger als	
Abbildung 5-49: V über weniger	erteilung der Mischzeit in KW II jeweils für den C1-Beton und Mischer 1. Links ist die Verteilung alle Chargen aufgetragen und rechts beschränkt auf die Chargen mit einer Mischdauer von als 120 sec
Abhildung 5-50. V	erteilung der Mischzeit in Will (links) und Will (rechts) für den LIB
Abbildung 5-51· V	erteilung der Mischzeit in Wil (links) und Will (rechts) für den OB

Abbildung 5-52: Verteilung der Mischendleistung in KW I (links) und KW II (rechts) jeweils für C1-Beton und Mis 1	scher 85
Abbildung 5-53: Verteilung der Mischendleistung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den UB für Mischer 1 (c und Mischer 2 (unten)	oben) 86
Abbildung 5-54: Verteilung der Mischendleistung in Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB	
Abbildung 5-55: Verteilung des w/z-Werts für KW I (links) und KW II (rechts) für den C1 Beton und Mischer 1	
Abbildung 5-56: Verteilung des w/z-Werts für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den UB	87
Abbildung 5-57: Verteilung des w/z-Werts für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB	
Abbildung 5-58: Temperaturverteilung für Köln-Wahn und Wittlich	
Abbildung 5-59: Betontemperatur für KW I (links) und KW II (rechts)	
Abbildung 5-60: Betontemperatur für Wi I (links) und Wi II (rechts) für den OB	
Abbildung 5-61: Exemplarischer Tagesverlauf von Mischzeit, Endleistung, w/z-Wert, Temperatur, Gesamtwasse Nachdosierwassermenge in Köln-Wahn	r und 89
Abbildung 5-62: Exemplarischer Tagesverlauf von Mischzeit, Endleistung, w/z-Wert und Temperatur für a) OE b) UB in Wittlich	3 und 90
Abbildung 5-63: Deaktivierte Feuchtemesssensorik	91
Abbildung 5-64: Feuchteeinstellung in KW I (links) und KW II (rechts)	
Abbildung 5-65: Feuchteeinstellung über gesamten Zeitraum in Wi II (links) und an Tagen mit Automatikbe (rechts). OB (oben), UB (unten)	etrieb 92
Abbildung 5-66: Wassernachdosierung über gesamten Zeitraum in Wi II (links) und an Tagen mit Automatikbe (rechts) für den OB (oben) und UB (unten)	etrieb 93
Abbildung 5-67: Übersicht Misch- und Lagerplatz	
Abbildung 5-68: Asphaltierte Lagerfläche für feine Gesteinskörnungen mit ausreichender Entwässerungsmöglic	hkeit 95
Abbildung 5-69: Exemplarisch Sattel mit eckiger Mulde und Kennzeichnung	
Abbildung 5-70: Exemplarisches Einbaudiagramm auf der Baustelle Dieblich I	
Abbildung 5-71: Rundenzeitanalyse	
Abbildung 5-72: Beispiel einer Fehlstelle in der Unterbetonoberfläche.	102
Abbildung 5-73: Qualitätsschwankungen im Unterbeton während des Einbaus (links) und der fertigen Fahr (rechts).	bahn 102
Abbildung 5-74: Sensorikaufbau am Gleitschalungsfertiger.	103
Abbildung 5-75: Referenzbox an einem Leitpfosten	104
Abbildung 5-76: Aufbau der GPS-Basisstation	105
Abbildung 5-77: Übersichtkarte der Betonbaustelle auf der A61 bei Dieblich	106
Abbildung 5-78: Maschinenstopps im dokumentierten Baustellenabschnitt.	106
Abbildung 5-79: Ebenheitssimulation der Einzelspuren sowie die resultierende Ebenheit	107
Abbildung 5-80: Simulierte Ebenheit mit Maschinenstopps	107
Abbildung 5-81: Darstellung der Ebenheitssimulation auf einem 10 x 10 cm Raster	107
Abbildung 5-82: Häufigkeitsverteilung der Unebenheiten der analysierten Baustellen	108
Abbildung 5-83: Summenverteilung der Unebenheiten	109
Abbildung 5-84: Örtliche FFT der Ebenheitsmessungen für links (oben) und rechts (unten) pro Fahrspur	109
Abbildung 5-85: Übersicht über Messsysteme am Fertiger	110
Abbildung 5-86: Lage der Wetterstation des DWD	111
Abbildung 5-87: Typisches Geschwindigkeitsprofil des Fertigers in Köln-Wahn (oben) und Wittlich (unten)	111
Abbildung 5-88: Verteilung der Stoppzeiten über alle Einbautage in Köln-Wahn	112
Abbildung 5-89: Übersicht über IMU Messdaten. Schwarze Striche unterteilen den Messbereich in Vor	lauf-,
Fertigung-, Nachlauf- und Standphase	112
Abbildung 5-90: Frequenzanalyse der am Fertiger aufgenommenen IMU Daten unterteilt in Vorlaufs-, Fertigu Nachlauf- und Stillstandsphase	ings-, 113
Abbildung 5-91: Vergleich der gefilterten IMU Daten und Korrelation zur Geschwindigkeit und Neigung	114

Abbildung 5-92: Temperaturdaten der Wärmebildkamera über die aufgezeichneten 40 Kacheln	115
Abbildung 5-93: Schematische Versuchsdurchführung der Dübellagenmessung	116
Abbildung 5-94: FGSV AP 67 (Bild 1): Koordinaten und Messgrößen zur Beschreibung der Dübellage	117
Abbildung 5-95: Messung der Dübellage	118
Abbildung 5-96: Messabruch wegen Störquelle	118
Abbildung 5-97: Exemplarische Auswertung einer Dübellagenmessung	119
Abbildung 5-98: Höhenlage der Dübel	120
Abbildung 5-99: Längsverschiebung von Dübeln	121
Abbildung 5-100: Gyratorprobe mit Ausfallkörnung (rechts) und stetiger Sieblinie (links).	121
Abbildung 5-101: Erstarrungsverhalten einer Gyratorprobe	123
Abbildung 5-102: Auszug aus den Schnittprotokollen zur Nachbearbeitung vom 28.06.2018 (a) und 18.06.2018 (b).	124
Abbildung 5-103: Temperatur- und Sonnenscheinverlauf am Fertiger während der beiden betrachteten Einbautage	125
Abbildung 5-104: Einzelkomponenten einer "Drahtanlage"	126
Abbildung 5-105: Schematische Darstellung der Definition eines achsbezogenen Gittermodells entlang einer Fahrzeug- traiektorie oder Straßenachse	127
Abbildung 5-106: Laserscan einer Betonfahrbahn (links) und überlagertes 3D-Oberflächenmodel im 0.1m * 0.1m	1
Raster (rechts). An jeder Stelle des Rasters können Längs- und Querprofile extrahiert und diese hinsichtlich Ebenheit analysiert werden. Dieselbe Systematik ist auf Laserscans der Unterlage	: 2
anwendbar	127
Abbildung 5-107: Prinzipdarstellung der gleitenden 4-m-Lattensimulation [FGSV 2009]	128
Abbildung 5-108: Berechnungsschema für das Bewertete Längsprofil [Ueckermann et al. 2008]	129
Abbildung 5-109: Schematische Darstellung des IRI als sogenanntes quarter-car model [ACPA 2002].	129
Abbildung 5-110: Situation zum Zeitpunkt der Messung auf der A61 am 4./5.12.2017. Die Messergebnisse mussten leider verworfen und die Messungen 2018 wiederholt werden.	ı 130
Abbildung 5-111: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Dieblich-Boppard BAB	\$
A61 Teil II (Messung vom 07.08.2018)	131
Abbildung 5-112: Wellenbildung aufgrund einer fehlerhaften Feinfräsung. Das Foto oben zeigt den betroffenen Bereich. Die Wellenbildung ist bei Nässe besonders gut zu sehen. Unten ist die PSD-Analyse für die rechte und für den Standstreifen (grün Hauptfahrstreifen (rot und blau), was durch die Ebenheitsindikatoren widerspiegelt. Dafür von 1 – 1.3 m in der PSD-Analyse für die Rollspuren des ist auf die Wellenbildung infolge der fehlerhaften Feinfräsung in Baustelle zurückzuführen.Das Foto oben zeigt den betroffenen 	132
Abbildung 5-113: 3D-Analyse der Vertikaldeformation im Bereich des Hauptfahrstreifens bei Messmeter 2700. Linksisteine 3D-Punktwolke von 12m Länge und ca. 4.2m Breite in perspektivischer Ansichtentsprechend ihrerReflexionsintensitätswerte in Graustufen dargestellt. Der rechts dargestelltenBuckel (rot) entlang derQuerscheinfuge führt zu einer relativen Höhendifferenz von ca. 1 cmauf weniger als 1 m Länge. In derlinken Rollspur ist die Deformation weniger stark ausgeprägt.	; ; , , 133
Abbildung 5-114: Brückenbauwerk im Bereich der Anschlussstelle Koblenz/Waldesch bei Messmeter 2450m	133
Abbildung 5-115: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Dieblich-Boppard BAB A61 Teil II (Messung vom 14.12.2018)	; 134
Abbildung 5-116: 3D-Analyse der Vertikaldeformation im Bereich des Hauptfahrstreifens exakt auf Höhe der Tankstelle Mosel-West. Links ist eine 3D-Punktwolke von 10m Länge und ca. 4.2m Breite in perspektivischer An- dargestellt. Die rechts dargestellten Buckel und Senken führen vor allem in der linken Rollspur zu einer relativen Höhendifferenz von ca. Rollspur ist die Deformation weniger stark ausge- Peaks der Indikatoren DBL und SBL bei Messmeter 350 m Senken führen vor allem in Graustufen in Fahrstreifen 1 (siehe Abbildung 5-116). Dieselbe Stelle ist auch im Fahrstreifen 0 auffällig.	

 Abbildung 5-117: Übersicht über die Lage der Baustelle (links: blau). In der rechten Teilabbildung sind die Messlinien (Trajektorien) des Messfahrzeuges im Zuge der Tragschicht- und der Deckenmessung dargestellt
Abbildung 5-119: Bereich, für den 3D-Daten der Tragschichtoberfläche aufgenommen werden konnten. Aufgrund eines Grabens konnte das Messfahrzeug die restlichen Baustellenbereiche nicht befahren 136
Abbildung 5-120: Oberblick über die seitens L+P definierten Analysebereicne, innernalb derer die bannweisen Ebenheitsmessungen gemittelt wurden. Die Pfeile geben die Befahrungsrichtung an
19.09.2018.) Alle Indikatoren wurden innerhalb der Auswerteblöcke gemittelt
Abbildung 5-122: Die Grafik zeigt die approximierten Schichtdicken als farbkodierte Heatmap in einem geoinformations- system. Die Zellauflösung des Modells beträgt 1m*1m. Von der Firma Schnorpfeil entnommene Bohr- kerne sind als weiße Punkte dargestellt. An jedem Bohrkern steht die entsprechende ID und die Abwei- chung zwischen der mittels Beprobung gemessenen und der im Modell approximierten Schichtdicke. dass die Modellierung eine 4 cm zu geringe Schichtdicke Ein delta-Wert von 4 cm bedeutet hierbei, angibt.
Abbildung 5-123: Vergleichende Darstellung eines Profilschnittes durch einen Teil im Bereich der Fertigerbahn 8. Wäh- diace effensicht
Abbildung 5-124: Ebenheitsanalyse der Betondecke im Rahmen der Baustellenanalyse von Wittlich-Salmtal BAB A1
Teil I (Messung vom 13.12.2018)
Abbildung 5-125: Fahrkomfortanalyse auf Basis der International Roughness Index (IRI) für die drei untersuchten Fahr-Fahr-streifen (Messung vom 13.12.2018).141
Abbildung 5-126: Dargestellt ist links eine nach der Reflexionsintensität in Graustufen eingefärbte 3D-Punktwolke der Betondecke. Rechts ist die Vertikalabweichung zu einer in die 3D-Oberfläche eingepassten fläche. Im hinteren Bereich der perspektivischen Ansicht auf das 3D-Modell, welches etwa an Messme- ter 950 liegt, ist eine Längswelle von ca. 20 m Länge erkennbar, die sich im Schwanken in Längsrich- äußert (ca. 2 cm Höhenschwan-tung zwischen den Farben Rot über Grün zu Blau und wieder zurück kung auf ca. 10m Länge)
Abbildung 5-127: Dargestellt ist links eine nach der Reflexionsintensität in Graustufen eingefärbte 3D-Punktwolke der Betondecke. Rechts ist die Vertikalabweichung zu einer in die 3D-Oberfläche eingepassten fläche. Im hinteren Bereich der perspektivischen Ansicht auf das 3D-Modell, welches etwa an Messme- ter 1550 liegt, ist eine Längswelle von ca. 10 m Länge erkennbar, die sich im Schwanken/Schwingen in Längsrichtung zwischen den Farben Rot über Grün zu Blau und wieder zurück äußert (ca. 1cm Höhen-142
Abbildung 5-128: Regennasse Fahrbahn während der Messung am 12.12.2019
Abbildung 5-129: Ergebnis der Ebenheitsanalyse für die drei untersuchten Fahrstreifen der Baustelle zwischen Salmtal und Wittlich auf der BAB A1 (Messung vom 12.12.2019). Aufgrund der vorherrschenden Oberflächen- feuchte sind Aussagen zur Ebenheit nicht für den gesamten Auswertebereich möglich. 144
Abbildung 5-130: Prinzip der Differenzbildung von Unterlage-Scan und Decke-Scan zur Approximation der Einbaustärke ΔZ. Die beidenlinken Abbildungen zeigen den Bereich des Scans um die Referenz- Box in einer Schrägansicht im Tragschicht-Scan(oben) und im Decken-Scan (unten).145
Abbildung 5-131: Karte der farblich kodierten relativen Schichtdicke in Bezug auf die Soll-Einbaustärke von 27 cm. Ergän- zend ist die Lage der Prüfpunkte A, B und C sowie der Referenzbox eingetragen. Im Hintergrund sind die Plattengrenzen und Straßenmarkierungen leicht durchscheinend dargestellt. 145
Abbildung 5-132: Übersicht der Temperaturmesswerte an der Mischanlage, am Fertiger und an den Wetterstationen (ohne Labormessungen) am 14.08.2018 (oben) und 18.08.2018 (unten)
Abbildung 5-133: Übersicht der Temperaturmesswerte an der Mischanlage, am Fertiger, an den Wetterstationenundbei den Labormessungen am 28.06.2018 auf der Baustelle Köln-Wahn.148
Abbildung 5-134: Detaillierterer Vergleich der Temperaturverläufe der Luft (oben) und des Betons (unten) am 28.06.2018
Abbildung 5-135: Synchronisation der Daten der Mischanlage und des Fertigers151

Abbildung5-136:SynchronisierteDarstellungderEndleistungderMischanlage,derTransportzeit,derEinbaugeschwin-digkeit und der Oberflächenebenheit über einen Einbautag anhand dererfassten Daten der BaustelleKöln-Wahn151
Abbildung 5-137: Beispiele der Oberflächenebenheit: a) Handeinbaufeld und Schachtdeckel, b) Fugenschnitt
Abbildung 5-138: Regelungstechnische Betrachtung eines Systems
Abbildung 5-139: MindMap zur Qualität I: Fahrbahnqualität
Abbildung 5-140: MindMap zur Qualität II: Fahrbahnherstellung
Abbildung 5-141: Herausforderung der Zuordnung messbarer Größen zu Qualitätsindikatoren am Beispiel der Mischan- lage
Abbildung 5-142: Beispiel der implementierten Anwendung einer online Anzeige für KW I zur Ansicht genereller Baustellenstatistiken. Daten wurden noch offline erhoben und manuell in Datenbank eingepflegt
Abbildung 5-143: Mobile Anzeige der Daten auf einem Tablet
Abbildung5-144: Teilstücke aus der Fahrbahndecke des Bauvorhabens Flughafen Köln-Wahn mit bereits entnommenen und B nochmals zusätzlichPrüfkörpern zur Weiterverarbeitung. Nachträglich wurden aus der Platte A Bohrkerne entnommen (BK A17-24 und BKA17-24)
Abbildung 5-145: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit, ermittelt an Prüfkörpern, die längszurOberfläche und über die Dicke verteilt, aus der Betonplatte A und B gewonnen wurden166
Abbildung5-146:AbhängigkeitzwischenElastizitätsmodulundDruckfestigkeitunterAngabederStandardabweichung(SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben(n), ermittelt an Prüfkörpern,die längs zur Oberfläche und über die Dicke verteilt, aus derBetonplatte A und B gewonnen wurden
Abbildung 5-147: Mantelflächen von Bohrkernen die aus der Platte A (Nr. 1-8) und B (Nr. 1-8) gewonnen wurden, sowie, exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (f _{ct,sp}).
Abbildung 5-148: Mantelfläche eines Bohrkernes aus Platte A sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Be- Druckfestigkeitstimmung der Spaltzugfestigkeit (f _{ct,sp}), des statischen Elastizitätsmoduls (Ec) und der (fc) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung (Pfeile).168
Abbildung5-149:AbhängigkeitzwischenElastizitätsmodulundDruckfestigkeitunterAngabederStandardabweichung(SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben(n), ermittelt an Bohrkernen,die senkrecht zur Oberfläche aus der Betonplatte A (Nr. 9-16,Abbildung 4.148 links) und B (Nr. 9-16,Abbildung 5.148 rechts) gewonnen wurden.
Abbildung 5-150: Mantelfläche eines Bohrkernes aus Platte A sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Be- Druckfestigkeit (fc)stimmung der Spaltzugfestigkeit (fct, sp), der zentrischen Zugfestigkeit (fct) und der unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung (Pfeile).169
Abbildung 5-151: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), Bohrkernen, die 24) gewonnen wurden.des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an senkrecht zur Oberfläche aus der Betonplatte A (BK A17-24) und B (BK B17- 170
Abbildung5-152:AbhängigkeitzwischenSpaltzugfestigkeitundDruckfestigkeitunterAngabederStandardabweichung (n), ermittelt an Bohrkern- Betonplatte A (BK A17-24) und(SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben scheiben der oberen und unteren Randfaser aus Bohrkernen der B (BK B17-24)
Abbildung 5-153: Teilstücke aus der Fahrbahndecke des Bauvorhabens Wittlich - Salmtal mit bereits entnommenenPrüf-körpern zur Weiterverarbeitung.171
Abbildung5-154:AbhängigkeitzwischenElastizitätsmodulundDruckfestigkeitunterAngabederStandardabweichung (n), ermittelt an Prüfkörpern, der Betonplatten C und D gewon-(SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben die längs zur Oberfläche aus dem Oberbeton und dem Unterbeton nen wurden.171
Abbildung 5-155: Mantelflächen von Bohrkernen die aus der Platte C und D gewonnen wurden, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (fct,sp)
Abbildung 5-156: Baumaßnahme Salmtal - Wittlich BAB A1, Bohrkernentnahme im Standstreifen (links) und entnomme-ner Bohrkern bei km 115+500 (rechts).173

Abbildung 5-157: Mantelfläche eines Bohrkerns, welcher aus der Fahrbahndecke der Baumaßnahme A1 gewonnen wurde, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls (E_c), der zentrischen Zugfestigkeit (f_{ct}) und der Druckfestigkeit (f_c) unter Angabe der Richtung der Abbildung 5-158: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 7 km Streckenlänge Abbildung 5-159: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an (SD), Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 7 km Streckenlänge entnommen Abbildung 5-160: Baumaßnahme AS Leipzig – AD Schkeuditz BAB A14, Beginn des Streckenloses bei km 87+000 (links) und dazugehöriger Bohrkern bei Plattennummer 0001. 175 Abbildung 5-161: Mantelfläche eines Bohrkerns, welcher aus der Fahrbahndecke der Baumaßnahme A14 gewonnen wurde, sowie exemplarisch die Prüfkörperentnahme für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (fct.sp), des statischen Elastizitätsmoduls (Ec), der zentrischen Zugfestigkeit (fct) und der Druckfestigkeit (fc) unter Angabe der Richtung der Lastaufbringung im Versuch (Pfeile)......175 Abbildung 5-162: Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung (SD), des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an Bohrkernen, die gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 8 km Streckenlänge Abbildung 5-163: Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit unter Angabe der Standardabweichung des Variationskoeffizienten (Var.) und Anzahl der geprüften Proben (n), ermittelt an (SD). gleichmäßig verteilt im Standstreifen auf 8 km Streckenlänge entnommen Bohrkernen, die Abbildung 5-168: Messfehler LP-Töpfe 6 Liter (Wassersäulenverfahren) 182 Abbildung 5-169: Abweichung des Verdichtungsmaßes bei selben Betoncharge und unterschiedlichen Prüfern...... 184 Abbildung 5-171: Temperaturverlauf der Vorortmessung Köln-Wahn 186 Abbildung 5-179: Übersicht der Primärwellen aller Messungen 193 Abbildung 5-180: Übersicht der Sekundärwellen aller Messungen......194 Abbildung 5-182: Wendepunkte der Sekundärwellen 195 Abbildung 6-1: Blick in das Mischgefäß des Einwellenmischers CEM 60 S ELBA mit Gummiaufsatz auf dem Abbildung 6-2: Abbildung 6-3: links: Freifallmischer Typ Betonmischer Zementmischmaschine 150 L 650 W Stahl in Orange Abbildung 6-4:

Abbildung 6-5: Packungsdichte	Darstellung a) des realen Volumenanteil und b) virtuellen Volumenanteils zur Berechnung der 209
Abbildung 6-6: Andreasen-Mo Korngrößenber	links: Idealsieblinie in Zusammenhang mit dem Verteilungsmodul q nach dem modifizierten dell rechts: Sieblinienoptimierung der abgebildeten Modelle mit unterschiedlichen q-Werten im reich 63 μm bis 32 mm
Abbildung 6-7:	Schematische Darstellung der A: apollonischen und B: der gesperrten Packung
Abbildung 6-8: nach Hummel	Kornverdichtung von Sand/Basalt-Gemischen in Abhängigkeit von Kornform und Verdichtung 211
Abbildung 6-9:	Zusammenhang zwischen tatsächlicher Packungsdichte und Verdichtungsindex für eine
Einkornschüttu	ng 212
Abbildung 6-10:	Charakterisierung der Kornform nach Form, Rundheit und Oberflächenstruktur nach Barett 21
Abbildung 6-11:	Messgerät PartAn 3D zur Charakterisierung der Partikel/Gesteinskörnungen
Abbildung 6-12: Sc	hematische Darstellung der Kompaktheit einer Gesteinskörnung
Abbildung 6-13:	links: Versuchsaufbau des LPC-Verfahrens rechts: Ermittlung der Höhe für das LPC - Verfahren ۲۱
Abbildung 6-14:	Laser Partikelgrößenermittlung mit dem S3500 Microtrac
Abbildung 6-15: Sieblinienoptim	Ablauf der durchzuführenden Untersuchungen, um die Mischungsrezeptur mittels nierung bzw. mittels Partikeldichteoptimierung zu verbessern
Abbildung 6-16:	Graphische Siebanalyse mit PartAn 3D am Beispiel der Gesteinskörnungsklasse 5/8
Abbildung 6-17:	Graphische Siebanalyse mit PartAn 3D am Beispiel der Gesteinskörnungsklasse 5/8 225
Abbildung 6-18: dargestellt	Kornzusammensetzung der Ausgangsrezeptur des Waschbetons mit der Software EMMA 231
Abbildung 6-19: dargestellt	Kornzusammensetzung der Ausgangsrezeptur des Oberbetons mit der Software EMMA 231
Abbildung 6-20:	Darstellung der eingegebenen Daten und Parameter in BetonlabPro für den Waschbeton
Abbildung 6-21:	Darstellung der eingegebenen Daten und Parameter in BetonlabPro für den Unterbeton
Abbildung 6-22:	EXCEL-Darstellung der sieblinienoptimierten Mischungsrezeptur für den Waschbeton
Abbildung 6-23:	EXCEL-Darstellung der sieblinienoptimierten Mischungsrezeptur für den Unterbeton
Abbildung 6-24:	Mit der Software EMMA sieblinienoptimierter Mischungsentwurf für den Waschbeton
Abbildung 6-25:	Mit der Software EMMA sieblinienoptimierter Mischungsentwurf für den Unterbeton
Abbildung 6-26:	Mischungsentwurf für den Oberbeton (Spalte 1), mit BetonLabPro optimiert (Spalte 2)
Abbildung 6-25:	Mischungsentwurf für denUnterbeton (Spalte 1), mit BetonLabPro optimiert (Spalte 2)
Abbildung 6-28: Toleranzbereic	Luftporengehalte und Verdichtungsmaße der hergestellten Straßendeckenbetone sowie die he der Kennwerte (gestrichelt)
Abbildung 6-29: Fu	nktionsstrukturdiagramm für ein Schwerlastservogetriebe
Abbildung 6-30: M	agnetoresistiver Sensor der Firma Torque and More GmbH243
Abbildung 6-31: Charge wird gemesse verglichen (r)	Vorgehen zur Berechnung und Interpolation des Leistungssignals. Die Leistungsmessung einer (I) en, eine Interpolierte Referenzkurve erstellt (m) und diese mit simulierten Kurven 244
Abbildung 6-32:	Optimierte Mischprozessführung für unterschiedliche Strategien, Verschleißoptimiert (I), iert (r)
Abbildung 6-33: Pr	inzipielle Regelstruktur eines Antriebsstrangs zur Umsetzung der rheologiegestützten Misch 245
Abbildung 6-34. Se	hwerlastservogetriebe Außenansicht 243
Abbildung 6-35: Sc	hwerlastservogetriebe Axialschnitt Schneckenwelle (links) und Axialschnitt Abtriebswelle (rechts)
Abbildung 6-36: Ha	alterung TAM-Sensor
Abbildung 6-37: Te	ecknikumsmischer, Blick auf die Antriebsseite mit Motor
Abbildung 6-38: M	ontage Schwerlastservogetriebe mit Laterne
Abbildung 6-39: Kl	auenkupplung
Abbildung 6-40: Ko	ppelelemente für die Getriebesychronisation und den Antrieb des zweiten Getriebes

Abbildung 6-41: Einbau	umaße Technikumsmischer inklusive direkt antreibendem Motor	. 251
Abbildung 6-42: Schem	natische Darstellung der Topologie des Antriebsstrangs einer herkömmlichen Mischanlage	. 252
Abbildung 6-43: Sche Labormischers	ematische Darstellung der optimierten Topologie des Antriebsstrangs des Liebhe DW0.06/100	rr 252
Abbildung 6-43: Zusan Waschbeton	mmensetzung der in der Bachelorarbeit von Balzer analysierten Frischbetonrezeptur für ei ne	n 254
Abbildung 6-45: S	Super LP-Topf nach Bottke	. 255
Abbildung 6-46: S	Super Air Meter (SAM)	. 255
Abbildung 6-47: S	Schematische Darstellung des Ablaufs der Versuchsdurchführung mit dem Super Air Meter	. 256
Abbildung 6-48: S	Schematische Darstellung des Ablaufs der Versuchsdurchführung mit dem Super Air Meter	. 257
Abbildung 6-49: Z	Zusammenhang zwischen der SAM Nummer und dem Abstandsfaktor	. 258
Abbildung 6-50: A	Air Void Analyzer (AVA) - Funktionsweise	. 259
Abbildung 6-51: K Luftblasen während	Käfig mit Spritze (links); Air Void Analyzer beim Befüllen mit Spritze (mitte); aufsteigena nd dem Versuch (rechts)	le 259
Abbildung 6-52:	Luftporengehalt in Abhängigkeit vom w/z-Wert Super LP-Topf nach Bottke	. 261
Abbildung 6-53: E	Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf, dem Super LP-Topf nach Bottk	e
und dem AVA in Ab	phängigkeit des w/z-Wertes bei einer Mischdauer von einer Minute	. 262
Abbildung 6-54: E	Ergebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung für den LP-Bildner PANTHAPOR 2020	. 262
Abbildung 6-55: Erge	ebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung für den LP-Bildner PANTHAPOR 2020	. 263
Abbildung 6-56: E	Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf, dem Super LP-Topf nach Bottk	е
und dem AVA in Ab	phängigkeit der Mischdauer bei einem w/z-Wert von 0,42	. 264
Abbildung 6-57: E bei einem w/z-Wert	Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem LP-Topf in Abhängigkeit der Mischdaue t von 0,42	er . 264
Abbildung 6-58: E Abhängigkeit der M	Ergebnisse der Luftporengehaltsbestimmung mit dem Super LP-Topf nach Bottke n Aischdauer bei einem w/z-Wert von 0,42	'n 265
Abbildung 6-59: Erge PANTHAPOR 66K	ebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung abhängig der Mischdauer für den LP-Bildne	?r 266
Abbildung 6-60: Erge PANTHAPOR 2020	ebnisse der AVA-Messung zur Luftporenverteilung abhängig der Mischdauer für den LP-Bildne	?r 266
Abbildung 6-51: G	Grundidee: Liebherr der mischtechnische Kompetenz- und Lösungsanbieter	. 268
Abbildung 6-62: A	Ablaufdiagramm	. 269
Abbildung 6-63: La	abordoppelwellen Mischer mit Aufsatz zur Beschickung	. 270
Abbildung 6-64: B	Beton im DW-Labormischer	. 270
Abbildung 6-65: D	Definition von Sequenzen eines Mischprozesses innerhalb der Labormischer HMI	. 271
Abbildung 6-66: V Frischbeton 2	Vergleich analoger und digitaler Prüfmethoden zur Bestimmung des Ist-Wassergehalt i 273	n
Abbildung 6-67: F	Feuchteprüfstand im Liebherr-Technikum	. 274
Abbildung 6-68: R	Rüttler und Auffangbehälter des Feuchteprüfstandes	. 274
Abbildung 6-69: A	Aufsatz zur statischen Messung der Materialfeuchte	. 275
Abbildung 6-70: V	Vergleich statischer und dynamischer Messkurven zur Validierung der Kalibrierkurven	. 275
Abbildung 6-71: U	Unterschiedliche Sensorpositionen der Feuchtesensoren unterhalb der Dosieröffnung	. 276
Abbildung 6-72: A	Auswirkung der Sensorposition auf die erfassten Feuchtewerte bei Sand a+b	. 276
Abbildung 6-73: F	Feuchtemessung Kalibrierkurven Schnorpfeil und a+b	. 277
Abbildung 6-74: S	Sieblinien a+b Sand zu Schnorpfeil	. 277
Abbildung 6-75: Prallbl	lech unter Fischmaulöffnung bei Schnorpfeil Anlage	. 278
Abbildung 6-76: V	Vergleich der Sensor-Kalibrierkurve auf Anlage der Fa. Schnorpfeil	. 278
Abbildung 6-77: links:	Gyrator des Herstellers Control vom Typ Galileo rechts: Konisch	e
Rotationsfläche des	s Probekörpers	. 280
Abbildung 6-78: Verdic	chtungskurve für den Unterbeton	. 281
Abbildung 6-79: Verdic	chtungskurve für den Überbeton	. 281

Abbildung 6-80:	Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB	287
Abbildung 6-81:	Zusammenstellung der insgesamt 256 Mischversuche, die im Rahmen der Projektbearbe	itung
im IWB-Technii	kum mit der Liebherr DW 1,25 durchzuführen waren	290
Abbildung 6-82:	Materialverbrauch zur Durchführung der in Abbildung 69 aufgezeigten 256 Mischversuche.	290
Abbildung 6-83:	Anlieferung der Gesteinskörnung in Big-Packs und Lagerung der Big-Packs im Umfel	d der
Technikumsmi	schanlagei	
Abbildung 6-84:	Transport des Schüttgutes in der Schaufel mit dem Elektrostapler bis zum Förderband	l und
Abbildung 6 95:	desteniskonnung	
Abbildung 6 %	Pofüllung des Aufnahmetrichters des Eörderhands zur Poschickung der Taschensiles	
einem Big-Pack	< 292	mit
Abbildung 6-87:	Ausschnitt aus dem Chargenprotokoll	292
Abbilduna 6-88:	Transport der Betonblöcke mit dem Elektrostapler zum Betonsteinblocklager	293
Abbilduna 6-88:	Umaebaute Mischanlage am IWB mit neuem Motor und Getriebe	300
Abbilduna 6-88:	links oben: neuer Motor rechts: Beide CAVEX-Getriebe im einaebauten Zustand links u	inten:
CAVEX-Getrieb	e während des Einbaus am Kran hängend	301
Abbildung 6-91:	Mischungszusammensetzung von Unter- und Oberbeton entsprechend Abstimmung mi	t Pro-
jektpartnern	303	
Abbildung 6-92:	Messreihen mit dem Asynchronmotor für einen Mischversuch bei der Herstellung	eines
Oberbeton mit	einem w/z-Wert von 0,43. Nach der Zugabe des Anmachwassers (x-Achse = 0) erfolgte e	in 60
Sekunden dau	ernder Mischprozess (t = 600 pkt.). Anschließend wurde die Mischgeschwindigkeit über 10.0 chung her auf 0 sumächer fehren, heren dasse des Lecherschurgen stehe stimuter und der sich des Steherschurgen des Steherschurge	einen
Zeitraum von 1 Sekunden mit 4	.U Sekunden duj U zuruckgefanren, bevor dann das Losprechmoment bestimmt wurde, um ut einer stufenweisen Anbehung der Motordrehzahl eine erste Anglyse des rheologischen Verh	er 30 altens
des Betonaemi	isches mit dem Asvnchronantrieb zu erproben, oben: Motordrehzahl – während des Mis	chens
max. Drehzahl	1.500 U/min, Geschwindigkeit der Mischwelle erreicht mit Keilriemenscheibe des Liel	oherr-
Getriebes 21 U	/min mittig: Nenndrehmoment des Asynchronmotors unten: Motorleistung	305
Abbildung 6-93: betonverhalter	Zusammenstellung der Versuche zur Analyse des Einflusses des Mischprozesses auf das F n am Beispiel von Unter- und Oberbeton	risch- 307
Abbildung 6-94:	Vergleichende Gegenüberstellung der Messreihen mit dem Asynchronmotor für Mischver	suche
zur Herstellung	g eines Oberbetons links: w/z-Wert von 0,4 3 (Hinweis: Motor-Leistung in Abbildung in	[kW]
rechts: w/z-We	ert von 0,47 (Hinweis: Motor-Leistung wie dargestellt in [W]	307
Abbildung 6-94:	Phase I - w/z -Wert 0,43	309
Abbildung 6-96:	Ist-Geschwindigkeit der Mischerwelle in Phase I mit 0,63 m ³ Mischerinhalt	310
Abbildung 6-97:	Ist-Leistung der Versuchsphase I mit 0,63 m ³ Mischerinhalt	311
Abbildung 6-98:	Ist-Moment der Versuchsphase I mit 0,63 m³ Mischerinhalt	311
Abbildung 6-99:	Versuchsphase II - Unterschiedliche Drehzahlen mit unterschiedlichen w/z - Werten	312
Abbildung 6-100:	Ausschnitt aus den Ergebnissen der Versuchsphase I	312
Abbildung 6-101:	Erste Trajektorie mit unterschiedlichen Mischzeiten und -geschwindigkeiten	312
Abbildung 6-102:	Zweite Trajektorie der zu untersuchenden Mischregime	313
Abbildung 6-103:	Ergebnisse für die zweite Versuchstrajektorie des Mischregimes	314
Abbildung 6-104:	Entleerzeiten des Mischers abhängig der Geschwindigkeit des Mischers zum Mischende .	314
Abbildung 6-105: Mischpro- zes	Prinzipielle Regelstruktur eines Antriebsstrangs zur Umsetzung einer rheologiegesti ssführung	<i>itzten</i> 315
Abbildung 6-106:	Gesamtsystem des am IWB realisierten Mess- und Regelsystems	316
Abbildung 6-107:	Kommunikationsbausteine der integrierten Systemkomponenten	317
Abbildung 6-108:	Drehzahl-Zeit-Diagramm der Soll-Verlaufstraiektorie in definierten Mischseauenzen	319
Abbildung 6-109:	Drehzahl-Zeit-Diagramm des Ist-Größenverlaufs im Falle von w/z=0,45	320
Abbildung 6-110:A	Analyse der Prozessdaten	im
Bildbereich		321
Abbildung 6-112:	Analyse der Prozessdaten im Zeitbereich	323
--	--	--------------------------
Abbildung 6-113:	Analyse der Prozessdaten im Zeit-Motornennmoment-Diagramm	
Abbildung 6-113:	Ausschnitt aus der Analyse-App zur Illustration des Vorgehens bei Signalanaly	ise und
Bewertung im Zei	tbereich	325
Abbildung 6-115:	Analyse der Prozessdaten im Zeit-Leistungs-Diagramm	326
Abbildung 6-116: An	alyse der Prozessdaten im Zeit-Drehmoment-Diagramm	327
Abbildung 6-117: And	alyse der Phasenströme des Antriebs im Zeitverlauf	329
Abbildung 6-118: Dre und der anschließ	hmomentgeführte Analyse des Mischguts zur Bestimmung des Losbrechmoments enden Bestimmung einer Fließkurve nach [PCT/EP 2016].	330
Abbildung 6-119: Pro	bekörper nach dem Verdichten im Gyrator	
Abbildung 6-120: Erg Demonstrators an in Vorversuchen b	gebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des neiner unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstellungen pereits bestimmt	zweiten wurden 332
Abbildung 6-121: Erg Demonstrators an in Vorversuchen b	gebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des neiner unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstellungen pereits bestimmt	zweiten wurden 333
Abbildung 6-122: Erg	ebnis des Gyratorversuchs für den Fahrbahnbeton für die unbewehrte Bauweise des zw	eiten
Demonstrators an wurden in Vorvers	n einer unabhängigen Frischbetonprobe 1 eines Mischansatzes. Parametereinstell- suchen bereits bestimmt.	ungen 333
Abbildung 6-123: Get	riebe Teststand am DW2.5 mit Cavex Getriebe	
Abbildung 6-124: Ten 75 kW	nperaturdifferenz von 16 °C zwischen li/re Getriebe bei einer Mischerdrehzahl von 30 :	1/min und 334
Abbildung 6-125: Dre	hmoment und Leistung für unterschiedliche Drehzahlen am DW 2.5	
Abbildung 6-126: Det	ailausschnitt des Drehmoments und der Leistung für zwei Drehzahlen am DW 2.5	335
Abbildung 6-127: Sch	ematische Darstellung der Messpositionen	336
Abbildung 6-128: Ma	ximaler Schalldruckpegel der sieben Messpositionen.	
Abbildung 6-129: Fre	quenzgang der Schalldruckmessung	337
Abbildung 6-130: Fre	shCon Prüfgefäß und schematische Darstellung	
Abbildung 6-131: Blo	ckschaltbild der möglichen Kombination aus BEUS und FreshCon	
Abbildung 6-132: Pul	ser-Receiver-Schaltplan des entwickelten Messsystems	
Abbildung 6-133: Visu	ualisierung der bestückten Messplatine	
Abbildung 6-134: Fur	nktionsfähiges Messgerät im Showcase-Gehäuse, mit Ultraschallsensor Panametrics V6	01 343
Abbildung 6-135: Ver schallsensor und Abschnitt 4: Schal	gleich verschiedener Koppelmittel für die Optimierung des Energieübertrags zwischen Zwischenmedium. Abschnitt 1: Wasser, Abschnitt 2: Echotrace, Abschnitt 3: Ba löl.	Ultra ysilone, 344
Abbildung 6-136: Ent bei	twicklung der Wellenreflexionsamplitude zwischen Magnesium (20 mm) und Fahrbal	nbeton ca.
20°C. Die Flan-ke Stunden.	numkehr wurde nach ca. 11 Stunden registriert, das Amplitudenminimum nach	ca. 15 345
Abbildung 6-137: Ent	wicklung der Wellenreflexionsamplitude zwischen PMMA (14,6 mm) und Fahrbahnbe	eton bei ca.
20°C. Die Flanken	um-kehr wurde nach ca. 3,5 Stunden registriert, das Amplitudenminimum nach ca. 4 S	Stunden 345
Abbildung 6-138: Kon	nstruktionsskizze	
Abbildung 6-139: Exp	erimentalprüfstand	
Abbildung 6-140: Off	set-Gleitschalung (links) und gewählte Anordnung der Innenrüttler (rechts)	
Abbildung 6-141: Her	gestellter Betonstreifen (links) und Texturierung mittels Besenstrich (rechts)	
Abbildung 6-142: And	ordnung der Längs- und Querschnitte	
Abbildung 6-143: Säg	eschnitt quer zur Betonierrichtung	
Abbildung 6-144: Eir Betonier-	nfluss der Anordnung der Rüttelflaschen auf die Verteilung der Gesteinskörnung lä	ings zur

richtung bei Sägeschnitt 5 links (linkes Bild) und 6 links (mittleres Bild) im Vergleich zu einem real her- gestel Fahrbahndeckenbeton (rechtes Bild) 3	lten 50
Abbildung 6-145: Anordnung der Bohrkerne zur Ermittlung von mechanischen Betoneigenschaften	351
Abbildung 6-146: links: Erster, deutlich zu früher Schnitt; rechts: Ein später Schnitt mit glatter Schnittkante	353
Abbildung 6-147: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium PMMA; schwarz: Mittelwert der PMMA Messdaten	mit
Standardabweichungsbalken auf der Fahrbahnoberfläche, rot: PMMA-Messwerte vom Druckwürfel, g theoretischer Bürstzeitpunkt (bei dieser Betonrezeptur nicht zurteffend). 3	rün: 54
Abbildung 6-148: Entwicklung der P-Wellengeschwindigkeit im FreshCon-System. Erstarrungsende bei ca. 1500 r	n/s <i>,</i>
entsprechend 240 Minuten. 3	54
Abbildung 6-149: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium Magnesium; schwarz: Mittelwert der Messdaten mit Standardabweichungsbalken; rot: theoretischer Schnittzeitpunkt.	t 55
Abbildung 6-150: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit des Betons. Der Schnittzeitpunkt nach 17 Stun entspricht einer Würfeldruckfestigkeit von ca. 5 N/mm ²	den 355
Abbildung 6-151: Probebürstungen von links oben nach rechts unten mit zunehmenden Betonalter. Der optin Bürst-	nale
zeitpunkt wurde nach 15,5 Stunden erreicht (grün markiert). 3	56
Abbildung 6-152: WRF-Messung mit dem Zwischenmedium PMMA; grün: theoretischer Bürstzeitpunkt; re Bereich: Reflexion mit negativer Phase; blau: Reflexion mit positiver Phase	oter 357
Abbildung 6-153: Nomogramm zur Übertragung des optimalen Bürstzeitpunkts auf eine entfernte Messstelle Grundlage einer einzelnen, kontinuierlichen WRF- und Reifemessung (linke Reifekurve) und vertei	auf Iten
Temperaturmessungen (rechte, exemplarische Reifekurve)	358
Abbildung 6-154: Nomogramm zur Ableitung der Druckfestigkeit des Betons zum optimalen Bürstzeitpunkt. Da aus der zweiten Versuchsreihe.	iten 358
Abbildung 6-155: Prinzip der Differenzbildung von Unterlage-Scan und Decke-Scan zur Approximation Einbaustärke	der 359
Abbildung 6-156: Anbauskizze der Konzepte am Gleitschalungsfertiger.	360
Abbildung 6-157: Versuchsaufbau	361
Abbildung 6-158: Spur des Schlittens im Frischbeton (links) und zugesetzter Abstandssensor (rechts).	361
Abbildung 6-159: Messdaten des Konzeptes mehrerer Punktlaser	362
Abbildung 6-160: Aufbau des ersten Sensortests des Linienscanners	362
Abbildung 6-161: Skizze des Sensorkonzeptes 1D-Abstandslaser.	363
Abbildung 6-162: Reproduktion des Oberflächenprofils an simulierten Daten sowie die Ebenheitsbewertung	363
Abbildung 6-163: Funktionsweise des Konzeptes Linienlaser.	364
Abbildung 6-164: Simulierte aufeinanderfolgende Messlinien	365
Abbildung 6-165: Überlagerung zwei aufeinanderfolgender Messungen	365
Abbildung 6-166: Simulierte Messlinien und rekonstruiertes Oberflächenprofil	366
Abbildung 6-167: Profilrekonstruktion 50 Meter Länge	366
Abbildung 6-168: Richtlattensimulation	367
Abbildung 6-169: Frequenzanalyse über dem Weg	367
Abbildung 6-170: Gesamtaufbau des Prüfstandes	369
Abbildung 6-171: Laufrollenführung (links) und Kettenantrieb (rechts)	369
Abbildung 6-172: Linienlaser mit Schwenkeinrichtung	370
Abbildung 6-173: Skizzen der Referenzprofile	370
Abbildung 6-174: Gefertigtes Referenzprofil	371
Abbildung 6-175: Vermessung eines Referenzprofils	371
Abbildung 6-176: Rekonstruktion des Referenzprofils	372
Abbildung 6-177: Lage des Prüfstandes an der RWTH Aachen. Quelle: Google Earth GeoBasis-DE/BKG (©2009).	373
Abbildung 6-178: Anbau der Messtechnik bestehend aus PPS und Applanix POS LV 420 am 23.08.19 in Aachen (lir Aufbau des Portals direkt vor der ersten Messung am 26.08.19 (rechts).	ıks). 373

Abbildung 6-179: Foto des eingebauten Betons am 26.08.19 (links) und eine perspektivische Ansicht des 3D Laserscans (rechts)
Abbildung 6-180: Fotos von der Messsituation in der KW45. Mit Planen wurde versucht, die Betonoberfläche und den Prüfstand vor dem teils starken Regen zu schützen. Die gefertigte Betonoberfläche hinsichtlich Ebenheit zu analysieren war, wie rechts zu sehen, infolge des Regens nicht zielführend
Abbildung 6-181: Links ist der 2 m lange Referenzkörper im 3D-Laserscan des PPS Plus dargestellt. Der Graph in der rechten Teilabbildung zeigt den Vergleich zwischen dem Referenzsignal und dem gemessenen Signal der Prüfkörperoberfläche
Abbildung 6-182: Perspektivische Ansicht der Laserscans vom 26.08.2019 und 29.08.2019. Die 3D-Punktwolken sind
die Basis für die Extraktion und Analyse von Hohenlangsprofilen
Abbildung 6-183: Überlagerung der beiden am Prufstand aufgezeichneten Hohenlangsprofile. Die Y-Achse zeigt absolute Höhenlage [m] (WGS84-Höhe). Die X-Achse zeigt den Messmeter entlang des Prüfstands. Rot markiert sind die Bereiche, in denen die 4-Meter-Lattensimulation ein Stichmaß von 4 mm unter der Latte überschreitet.378
Abbildung 6-184: Analyse der spektralen Leistungsdichte (PSD) der Höhenlängsprofile vom 26.08.2019 (gelb) und 29.08.2019 (blau).Beginn und Ende der logarithmischen Skala der Y-Achse sind abgeschnitten
Abbildung 6-185: Fotos vom Betoneinbau
Abbildung 6-186: Fotos der Vermessung durch Schlitten (l.) und direkt vom Fertiger (r.)
Abbildung 6-187: Ebenheitsverläufe beider Messreihen
Abbildung 7-1: Zustandsautomat der vier wesentlichen Prozessschritte bei der Betonfahrbahnherstellung
Abbildung 7-2: Übersicht über den Gesamtbaustellenprozess unterteilt in die vier wesentlichen Prozessschritte. (Process and Data Modeling for System Integration – towards Smart Concrete Pavement Construction, 2020) 383
Abbildung 7-3: Schematischer Aufbau einer zweilagig gefertigten Betonstraße mit zwei Fahrspuren und einem Standstreifen [Skalecki et al. 2020]
Abbildung 7-4: Modellierung des Transportprozesses als Petri-Netz (MW Mischwerk, S Strecke F Fertiger)
Abbildung 7-5: Abstraktion der Fahrbahn als 1D Profil (rote Linie)
Abbildung 7-6: Ergebnisse der Simulation eines Fahrbahnprofils mit Literaturparametern unter Laborbedingungen (links) und mit realen Wetterdaten (rechts)
Abbildung 7-7: Verfahren zur Simulation des Mischprozesses
Abbildung 7-8: Mischgütebestimmung – Umsetzung realer Versuch versus Simulation
Abbildung 7-9: CFD Simulation der Wasserverteilung im Mischer mittels ANSYS
Abbildung 7-10: Vergleich des Wirkleistungsverlaufs zwischen der Mischanlage Liebherr MobilMix 2.5 von Schnorpfeil (oben) und dem Liebherr Labormischer DW 0.06 (unten) [Skalecki et al. 2020a]
Abbildung 7-11: Verlustcharakteristik des elektrischen Drehmoments an verschiedenen stationären Drehzahlenpunkten und quadratisches Modell (Linien) bei verschiedenen Temperaturzuständen [Skalecki et al. 2020a]
Abbildung 7-12: Mittelwertfreies, normalisiertes Frequenzspektrum des Drehmomentensignals bei einem Füllgrad von 60 l und einer Mischwellendrehzahl von 80 rpm (links) und die Maxima der ersten acht Vielfachen aller Frequenzspektren des experimentellen Versuchsprograms [Skalecki et al. 2020a]
Abbildung 7-13: Maxima der verschiedenen Frequenzspektren einer Tagesleistung in Köln-Wahn I der MobilMix Mischanlage {Skalecki et al. 2020a]
Abbildung 7-14: Vergleich der Schätzung des EKFs mit den Rohmesswerten (links) und Vergleich der Leistungsfähigkeiten der Filtertypen eines Mittelwertfilters (moving average), Butterworth Tiefpass (LP) und des vorgestellten EKF (mean EKF) (rechts). (Observer Design for non-stationary oscillating Disturbances in Mixing Processes, 2020)
Abbildung 7-15: Messsysteme: Kalorimeter (a) und FreshCon Gefäß (b)
Abbildung 7-16: Schematische Beschreibung des Versuchsaufbaus
Abbildung 7-17: (a) Mittlere (schwarz) und minimale bis maximale Temperaturentwicklung (grau) über alle Messungen für das quasi-adiabatische Kalorimeter im Vergleich zur Umgebungstemperatur (blau). (b) Beispielhafte Temperaturmessungen (durchgezogene Linie) für die ersten drei Klimazonen im FreshCon-Gerät im Vergleich zur Umgebungstemperatur (gestrichelt)
Abbildung 7-18: Skalierungsfaktoren, die sich anhand der Kreuzvalidierung ergeben (grau) und die aus der
Optimierung resultierenden Parameter (schwarz)

Abbildung 7-19: Vergleich des Literatur- (rot) und optimierten Parametersatzes (grün) der Modellvorhersage (gr gestrichelt) mit der Umgebungstemperatur (grau gepunktet).	rau 398
Abbildung 7-20: Zentraler Leitstand für Schnorpfeil Doppelanlage	400
Abbildung 7-21: Datenmodell eine Betonbaustelle und Synchronisation [Skalecki et al. 2020b]	401
Abbildung 7-22: GeoFences in dem Prozessmodell für die Materiallogistik	402
Abbildung 7-22: Georences in dem Hozessmoden für die Materialogistik.	/02
Abbildung 7-23. Kartendastending der Georences und Famzeugpositionen.	403
Abbildung 7-24. Hinzip der Integren Referenzsystems auf die GPS Positionen der mobilen Maschinen u	405 Ind
Vergleich zu den erfassten Nachbearbeitungsprotokollen für eine Tagesleistung.	404
Abbildung 7-26: Vorgehen zum Aufbau des Referenzsystem auf Basis der Sprühbühnenposition.	
Abbildung 7-27: Fehler zwischen Vermessung und selbst erstelltem Referenzsystem.	405
Abbildung 7-28: Erster Entwurf der Architektur und des Datenaustauschs für ein zentrales Prozessleitsystem	
Abbildung 7-29: Deskton Computer zum Hosten der virtuellen Infrastruktur	410
Abbildung 7-30: Aufbau der Architektur des Prozessleitsystems	411
Abbildung 7-31: Konzentioneller Ablauf des Datenmanagements	412
Abbildung 7-32: Benutzerinterface der Datenschnittstelle auf der Mischanlagensteuerung	413
Abbildung 7-33: Struktur der Datennakete der Mischanlagen API	414
Abbildung 7-34: Struktur der Datenpakete der Smartnhone Ann Überwachung der Materiallogistik	415
Abbildung 7-35: Ausschnitt des Konfigurationsinterfaces der Schnittstelle	415
Abbildung 7-36: Ablaufdiagramm der Telematikannlikation	416
Abbildung 7-37 Stationierung der GPS-Position	416
Abbildung 7-38: Struktur der Datenpakete aus der Fertiger Telematik API	
Abbildung 7-39: Struktur der Eertiger API	
Abbildung 7-40: Telematik Tracker der Nachbearbeitungsmaschinen	
Abbildung 7-41: Struktur der Datenpakete der Telematik Schnittstelle (links) und Nutzdaten der WebApplikat	ion
(rechts) der Nachbearbeitungsmaschinen.	419
Abbildung 7-42: Telematik Schlüssel Erfassung in der WebApplikation	420
Abbildung 7-43: Telematik Buchungen anlegen	420
Abbildung 7-44: Beispielanzeige der Webschnittstelle zur manuellen Dateneingabe auf einem Tablet	421
Abbildung 7-45: Übertragung der Ergebnisse aus Workshop für Wittlich II	422
Abbildung 7-46: Eingabeformulare der Sprüh- und Bürstprotokolle	423
Abbildung 7-47: Tabelle über bereits erfasste Sprühprotokolle	424
Abbildung 7-48: Formulare zur Erfassung der Messwerte Frischbetonüberwachung (links) und der Einschätzung d	der
Betonkonsistenz (rechts)	425
Abbildung 7-49: Übersicht über vorhandene Wetterdaten und die Ableitung von allgemeinen Wetterzustänc "regnerisch, feucht, bewölkt, sonnig"	len 426
Abbildung 7-50: Übersicht der erfassten Sprüh-, Bürst- und Schnittzeit	427
Abbildung 7-51: Untersuchung des Wettereinflusses auf den Schnittzeitpunkt bezogen auf den Sprühzeitstempel	l 427
Abbildung 7-52: Festigkeitsuntersuchung mit dem Schmidt-Hammer bei Schnitt	428
Abbildung 7-53: Schematische Darstellung eines Datenobjektes in OPC UA	429
Abbildung 7-54: Technischer Implementierungsvorschlag zur Kommunikation zwischen den Maschinen und de Leitstand.	em 430
Abbildung 7-55: Exemplarische Darstellungen der webbasierten Visualisierung (Links Baustellenübersicht, Mi Informationen Fahrzeug, Rechts Beispiel Kartendaten).	tte 430
Abbildung 7-56: Technisches Implementierungskonzept der Applikationsplattform durch einen zentra	aler
Leitstandsrechner	431
Abbildung 7-57: Konzept Baustellenvernetzung.	432
Abbildung /-58: Navigation BF4.0 WebApp	433
Abbildung 7-59: Ausschnitt aus der Baustellenübersicht der BF4.0 WebApp.	434
Abbildung 7-60: Betonherstellung Tagesleistung	435

Abbildung 7-61: Betonherstellung Produktionshistorie	435
Abbildung 7-62: Einbauprozess Tagesleistung	436
Abbildung 7-63: Einbauprozess Einbauhistorie	436
Abbildung 7-64: Einbauprozess Kartendarstellung mit Zeitauswahl	436
Abbildung 7-65: Einbauprozess Baustellenfortschritt	437
Abbildung 7-66: Nachbearbeitung Baustellenfortschritt (rot: Sprühbühne, grün: Bürsten, blau: Schneiden)	437
Abbildung 7-67: Dropdown zur Chargenzuordnung	438
Abbildung 7-68: Übersichtskarte der Logistikfahrzeuge (UB = Unterbetonkipper, OB = Oberbetonkipper)	438
Abbildung 8-1: Lage der Baumaßnahme, gesamte Strecke (blau) und Strecke am Demonstrationstag 16.11.2020) (rot).
	441
Abbildung 8-2 Ausschnitt aus Betoneinbauplan	443
Abbildung 8-3: Baufeld nach Herstellung der Frostschutzverfestigung als Unterlage für die Asphalttragschicht	443
Abbildung 8-4: Asphalttragschicht vor Einbau der Betonfahrbahn, Binderfläche als Referenz für den Fahrbahn	beton444
Abbildung 8-5: Asphalttragschicht vor Einbau der Betonfahrbahn, Binderfläche als Referenz für den Fahrbahn - Fahrbahnbeton	beton 444
Abbildung 8-6: Zerstörungsfreie Prüfung der Festigkeitsentwicklung	445
Abbildung 8-7: Veränderung LP-Gehalt über die Baustellen	445
Abbildung 8-8: Einbau Oberbeton mit nachgeführtem Finisher zur Verbesserung der Längsebenheit	446
Abbildung 8-9: unten rechts Raumfuge (Abgrenzung des Raumfugenfeldes), oben rechts Scheinfuge, links Ober	fläche
Abbildung 8 10: Veränderung der Längschenheit is Einbausshicht	/ 44
Abbildung 8-10. Veränderung der Längseberment je Einbauschicht	
Abbildung 8-11: Pransiech zur Verbesserung des Materianiusses über die Feuchtesonde	
Abbildung 8-12: Kiemenscheiden im Mischel	
Abbildung 8-15. Hvir der Zehtralen Leitstanussiederung	
Abbildung 8-14. Denutzennitenate der Datenschnittstene an der Mischanagenstederung	
Abbildung 8-15: Diopuowi zur einargenzuordnung der Erischbetonprotokolle in der RE4.0 WebApp	
Abbildung 8-10. Chargenzuorunung der Frischbetonprotokolle in der BF4.0 WebApp	4JZ ،
Abbildung 8-17. Omgeschlagene Watenalen für den Demonstrationstag aus der DF4.0 WebApp	
Abbildung 8-16. Kennzahlen und Produktionsleistung aus der BF4.0 WebApp.	
Abbildung 8-19. Keinizahlen und Produktionsleistung aus der BF 4.0 WebApp	
Abbildung 8-20. Froduktionsinstone der Betonnerstending aus der BF4.0 webApp.	4J4 ۸57
Abbildung 8-21: Konstruktion Anthebsenment, Embaustruation in der Anlage	
Abbildung 8-22: Anpassung der Konstruktion an Kiappkurve	
Abbildung 8-25. Gemessene Temperaturverlauf des CAVEX Getriebes während der Breduktion von Schnerpfeil auf dem zu	
Demonstrator (links mit aktiver Ölkühlung, rechts ohne aktive Ölkühlung)	459
Abbildung 8-25: Mischerleistung für die Mischanlage am 21 07 2021	460
Abbildung 8-26: Ausschnitt für einzelne Mischprozesse am 21.7.2021	
Abbildung 8-27 Laserscanner	
Abbildung 8-28 GPS Empfänger	
Abbildung 8-29 Telematikeinheit	
Abbildung 8-30 Maschinendisplay	
Abbildung 8-31 Wetterstation & Temperaturkamera	462
Abbildung 8-32: Scanneranbindung am Fahrwerk des Gleitschalungsfertigers	463
Abbildung 8-33: Ebenheitsmessung am Oberbetonfertiger	464
Abbildung 8-34: Globale Dübellage (Offsetkorrigiert)	465
Abbildung 8-35: Dübelabstand	466
Abbildung 8-36: Produktionsleistung des Fertigers der BF4.0 WebApp	466
Abbildung 8-37: Einbauhistorie der BF4.0 WebApp.	467

Abbildung 8-38: Baustellenfortschritt des Fertigers aus der BF4.0 WebApp.	3
Abbildung 8-39: Übersichtskarte mit Zeitschieber der Fertigerposition aus der BF4.0 WebApp	3
Abbildung 8-40: Vergleich der Einbaustrecken)
Abbildung 8-41: Lage der Demonstrator Baustelle auf der A61 zwischen den Anschlussstellen Boppard und Waldesch. Quelle Basemap: OpenStreetMap Mitwirkende	L
Abbildung 8-42: Messsystem S.T.I.E.R unmittelbar vor Beginn der Messungen auf der Tragschicht der Demonstrator Baustelle am 26.06.2021	L
Abbildung 8-43: Situation im Umfeld des Brückenbauwerks, welches sich im Messmeterbereich um 3200 m befindet.	5
Abbildung 8-44: Die Kurven zeigen die auf den Zielwert normierten Ebenheitsindikatoren PGR-MAX, DBL und SBL für den Bereich der Tragschicht, in der später der FSO entstehen wird. Zusätzlich sind Einzelereignisse, wie Quernähte und das Brückenbauwerk eingezeichnet (Messung vom 26.06.2021)473	3
Abbildung 8-45: Quernaht in der Tragschicht, welche den Peak in den Signalen der Ebenheitsindikatoren bei Messmeter 1250 erzeugt	1
Abbildung 8-46: Quernaht in der Tragschicht, welche den Peak in den Signalen der Ebenheitsindikatoren bei Messmeter 2290 erzeugt	1
Abbildung 8-47: Schematische Darstellung des Einflusses lokaler Deformationen in Abhängigkeit zur Lage des Höhenlängsprofils. Oben links: perspektivische Ansicht auf eine querlaufende Arbeitsnaht links Intensität als Graustufen kodiert. Oben rechts: dieselbe Situation mit farbkodierter relativer Höhe. Unten: Prinzipdarstellung für Höhenlängsprofile an drei verschiedenen Entnahmepositionen	5
Abbildung 8-48: Messsystem S.T.I.E.R unmittelbar vor Beginn der Messungen auf der Betondecke der Demonstrator Baustelle vor Grinding am 18.08.2021	5
Abbildung 8-49: Raue Struktur der Oberfläche im Bereich des Regenfeldes sowie Verunreinigungen der Fahrbahn durch teils große Steine	5
Abbildung 8-50: Ergebnisse der Ebenheitsanalyse für die Betondecke vor Grinding (Messung vom 18.08.2021). Die Kurven der Ebenheitsindikatoren sind überlagert dargestellt mit Informationen, die Seitens der Firma Schnorpfeil bereitgestellt wurden (Tagesnähte, Fertigerstops)	7
Abbildung 8-51: Unebenheit infolge eines Buckels, der sich an der tagesnaht im FSO an Messmeter 220 ausgebildet hat. In der Intensitätsinformation (links) ist ein sanierter Kantenschaden als schwarzes Rechteck entlang der Querscheinfuge zu sehen	7
Abbildung 8-52: Messfahrzeug S.T.I.E.R vor Beginn der Messungen am 01.10.2021	3
Abbildung 8-53: Vergleich von Ebenheitsindikatoren auf Basis von mit HRM-Verfahren erfassten Höhenlängsprofilen mit auf Basis von aus 3D-Oberflächenmodellen extrahierten Höhenlängsprofilen.)
Abbildung 8-54: Ergebnisse der Ebenheitsanalyse für die Betondecke nach Grinding (Messung vom 01.10.2021). Die Kurven der Ebenheitsindikatoren sind überlagert dargestellt mit ergänzenden Informationen (Bauweise, Verunreinigungen, Umfahrung von Hindernissen))
Abbildung 8-55: Das Bild zeigt einen Ausschnitt einem Umfeldkamerabild am Messsystem S.T.I.E.R. In den Bereichen, die in bewehrter Bauweise ausgeführt wurden, ist eine dafür charakteristische Querrissbildung festzustellen 480)
Abbildung 8-56: In Textur eingelegtes Tastwerkzeug des Sensors	<u>)</u>
Abbildung 8-57: Telematik Tracker der Nachbearbeitungsmaschinen	<u>)</u>
Abbildung 8-58: Echtzeitansicht Baustellenfortschritt der Nachbearbeitung (rot: Sprühbühne, grün: Bürsten, blau: Schneiden)	3
Abbildung 8-59: Schichtweise Darstellung der Nachbearbeitungsprotokolle	1
Abbildung 8-60: Standort des 2. Demonstrators	5
Abbildung 8-61: Übersichtskarte des zweiten Demonstrators	5
Abbildung 8-62: Echtzeitübersicht der Betonherstellung	5
Abbildung 8-63: Expertentabellen der Frischbetonprotokolle und -beurteilung	1
Abbildung 8-64: Positionen des Ober- und Unterbetonfertigers	3
Abbildung 8-65: Analyse der Dosiergenauigkeit der Gesteinsfraktionen	J
Abbildung 8-66: Vergleich der Verteilungen zwischen dem Handwert und der gemessenen Sandfeuchte	Ĺ
Abbildung 8-67: Streudiagramm Matrix der Kennwerte der digitalen Lieferscheine für den Unterbeton der Baustelle Witt II	1

Abbildung 8-68: Fahrstrecke einer Tagesleistung, Einbauhistorie, Trajektorie des Fertigers der Gesamtmaßnahme	495
Abbildung 8-69: Ebenheitsauswertung Aachen	496
Abbildung 8-70: Beispielhafte Überlagerung zweier Profile einer Messaufzeichnung aus Aachen	496
Abbildung 8-71: Ebenheitsauswertung Wittlich 3	497
Abbildung 8-72: Typische Oberflächenscans vom Prüfstand Aachen und Baumaßnahme Wittlich 3	497
Abbildung 8-73: Stärke des Rauschens des Laserscanners über sechs verschiedene Baustellentage	498
Abbildung 8-74: Vergleich der rekonstruierten Rundenzeiten mit der manuellen Erfassung der unterschiedlicher Logistikfahrzeuge.	r 500
Abbildung 8-75: Konzept der automatischen Bauwerksdokumentation für die Nachbearbeitung.	501
Abbildung 8-76: Big Picture der Rückverfolgbarkeit	502
Abbildung 8-77: Konsistenzvergleich zwischen Mischanlage und Frischbetonuntersuchung.	503
Abbildung 8-78: Zeitdifferenzen der Materiallogistik ab Produktion der ersten Betoncharge (links Unterbeton, rechts	5
Oberbeton)	504
Abbildung 8-79: Aufbereitung der positionsbezogenen Daten.	505
Abbildung 8-80: Zeitdifferenzen der Nachbearbeitungsschritte ab Einbau.	505
Abbildung 8-81: Vergleich zweier Ansätze zur Synchronisation zwischen Materiallogistik und Einbau.	506
Abbildung 8-82: Zeitdifferenzen aller Prozessschritte ab Betonherstellung.	507
Abbildung 8-83: Ermittelte E-Moduln am ersten Demonstrator	510
Abbildung 8-84: Ermittelte Rohdichten am ersten Demonstrator.	510
Abbildung 8-85: Raumfugenfeld und ausgebaute Betonteile.	511
Abbildung 8-86: Schnittfläche an einem Betonteil, längs zur Betonierrichtung	511
Abbildung 8-87: Betonteil mit der Kennzeichnung 8 (vgl. Abbildung 8-85, linkes Bild) nach der Entnahme von Bohrkernen.	ו 512
Abbildung 8-88: Ermittlung zu der zentrischen Zugfestigkeit korrespondierenden Spaltzugfestigkeit, ermittelt an	۱
Bohrkernscheiben	513
Abbildung 8-89: WRF-Messung an der Demonstratorstrecke	514
Abbildung 8-90: Erster (nach etwa 8 Stunden), zweiter (nach etwa 9 Stunden), dritter (nach etwa 10 Stunden), vierter (nach etwa 10 Stunden) und fünfter Probeschnitt (nach etwa 11 Stunden)	r 515
Abbildung 8-91: Sechster (nach etwa 12 Stunden), siebter (nach etwa 12,5 Stunden) und achter Probeschnitt (nach etwa 13 Stunden)	າ 515
Abbildung 8-92: WRF-Messung mit Magnesium als Zwischenmedium. Rot: optimaler Schnittzeitpunkt nach 12,5 Stunden auf Grundlage der Probeschnitte.	; 516
Abbildung 15-1: Liebherr Labormischer DW0.06/100 (links) und teil-automatisierte Beschickungseinrichtung (rechts)) 558
Abbildung 15-2: Aktorik und Sensorik am Labormischer DW0.06/100	559
Abbildung 15-3: Realmaßstäbliche mobile Betonmischanlage vom Typ Liebherr DW 1,25 im IWB-Technikum Pfaffenwaldring 4d an der MPA Universität Stuttgart – Taschenreihensilo mit 4 Gesteinskornkammern mit außen aufgestelltem Zementsilo (links) und Blick auf die hallenintegrierte Mischanlage (rechts)	ז ז 560
Abbildung 15-4: Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB	563
Abbildung 15-5: Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB	565
Abbildung 15-6: links oben: neuer Motor rechts: Beide CAVEX-Getriebe im eingebauten Zustand links unten: CAVEX-Getriebe während des Einbaus am Kran hängend	567
Abbildung 15-7: Abwasseranalage	567
Abbildung 15-8: Kapazitive Feuchtesonde	567
Abbildung 15-9: Konstruktionsskizze des Versuchsstands am IWB zur Prüfung der Messgüte verschiedener Feuchtemessprinzinien	568
Abbildung 15-10: Gesamtaufbau des Prüfstandschlittens	569
Abbildung 15-11: Linienlaser innerhalb der Abschattung	570
Abbildung 15-12: Weiterentwicklung des Prüfstandes	571
Abbildung 15-13: Mobile Laserscanning System S.T.I.E.R 3 der Firma L+P. Zwischen dem rechten Vorder- und Hinterrad befinden sich 4 nach dem HRM-Prinzip angeordnete Einzellaser zur Erfassung eines Höhenlängsprofils	3 1

in der rechten Rollspur. Am Heck sind ein Oberflächenlaserscanner sowie eine hochauflösende Oberflächenzeilenkamera samt zugehöriger Beleuchtungseinheit montiert	e . 572
Abbildung 15-14: Mobile Laserscanning System I.R.I.S der Firma L+P. Im Projektkontext sind vor allem der hinten an Dachträger mittig montierte Oberflächenscanner PPS sowie der rechts daneben montierte 350° Laserscanne	n r
CPS von Bedeutung.	. 574
Abbildung 15-15: Prinzipskizze der Architektur und des Datenaustauschs für ein zentrales Prozessieltsystem.	.5/5
Abbildung 15-16: Prinzipieller Aufbau der Hardwarearchitektur des zentralen Leitstands	.576
Abbildung 15-17: Übersichtsseite und Navigationsleiste (links) des Webinterfaces am Beispiel der Baustelle Köln Wahn I	- . 577
Abbildung 15-18: Detailanzeige und grafische Aufbereitung der aufgezeichneten Daten am Beispiel der Zeitverläufe	е
der Mischzeit und des Produktionsvolumens der Mischanlage an einem Einbautag	578
Abbildung 15-19: Auszug aus den online erfassten Sprühprotokollen	578
Abbildung 15-20: Eingabemaske des Onlineformulars am Beispiel der Schnittprotokolle für Wittlich II	579
Abbildung 15-21: Konzept Baustellenvernetzung.	. 580
Abbildung 15-22: Hybridbauweise	. 585
Abbildung 15-23: Befahrungsplan der Baustelle für den zweischichtigen Einbau	. 585
Abbildung 15-24: Besichtigung Mischanlage	586
Abbildung 15-25: Dieblich I Einbau	586
Abbildung 15-26: Dieblich I Nachbehandlung & Fugenschnitt	586
Abbildung 15-27: Wittlich Mischanlage und Lagerhaltung	590
Abbildung 15-28: Wittlich Einbau	. 590
Abbildung 15-29: Wittlich Lage der Baustelle/Mischanlage, Vorbereitungen mit Leitdraht und Dübeln sowie Fugenschnitt nach Einbau.	e . 590
Abbildung 15-30: Einbauort Köln-Wahn, Einbauplan und Lage zur Wetterstation	. 593
Abbildung 15-31: Mischanlage	. 593
Abbildung 15-32: Einbau	. 594
Abbildung 15-33: Frischbetonuntersuchungen	. 594
Abbildung 15-34: Fahrbahn	. 594
Abbildung 15-35: Betoneinbauplan	. 597
Abbildung 15-36: Eindrücke bei Vorabbegehung in Hamburg	. 598
Abbildung 15-37: Im September 2019 fertiggestellte Betonfahrbahndecke zwischen AS Leipzig und AD Schkeuditz	<u>,</u>
links in Waschbetonbauweise, rechts in Grindingbauweise	. 600
Abbildung 15-36: Teilerneuerung der östlichen Start- und Landebahn am Flughafen Stuttgart im April 2020	. 602

13 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Liste	aller untersuchten Baustellen nebst weiteren Angaben zu Streckenabschnitt und Bauzeitenfenster Weiteren genutzten Abkürzung der Baustelle	17
Tabelle 5 1. Über	rsicht der Kenngrößen der Baustellen gemäß Mischanlagendatenbank	62
Tabelle 5.2: Verg	leich Rezent C1 für KW Lund KW II	63
Tabelle 5.3: Mate		64
Tabelle 5.4: Verg	laich Rezent I IR für Will und Will	65
Tabelle 5.5: Verg	leich Rezept OB für (Wi I) und (Wi II)	66
Tabelle 5.5. Verg	leich der Qualitätsindikatoren für KW I. KW II. Will und Will gemittelt über beide Mischer	. 00
Tabelle 5.0. Verg	reicht über Detentomperaturen	. 04 00
Tabelle 5.7. Ober	anlarisch mit dem PDO Teol erfesste Drehlembeschreibungen auf der Paustelle Diehlich L	100
Tabelle 5.8: Exem	nplansch mit dem BPO Tool erlasste Problembeschreibungen auf der Baustelle Dieblich L	100
	sist der wichtigste Quelitätenersmeter (indikater des jeweiligen Teileregesses)	122
Tabelle 5.10: Wa	s ist der wichtigste Qualitätsparameter/-mukator des jeweingen renprozesses?	155
	s beeinflusst die Qualitat in innen Teliprozess (an meisten):	150
Tabelle 5.12: Wa	s beeinnusst aus inrer sicht die Produktqualität der Fahrbann (am meisten)?	150
Angabe der B	auweise (einschichtig/einlagig und zweischichtig)	165
Tabelle 5.14: Aus (Stabw.), Var	swertung der Spaltzugprüfung unter Angabe von Position, Mittelwert (MW), Standardabweichen iation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper für die Platte A (Nr. 1-8, Abbildung 5-148 links) und bildung 5-148 mehte	100
B (INF. 1-8, AD	bildung 5-148 rechts)	108
(Stabw.), Vari	iation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n) für die Platten C und D	172
Tabelle 5.16: Au Mittelwert	uswertung der Spaltzugprüfung für Ober- und Unterbeton unter Angabe des Bauabschnitts, (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper	176
Tabelle 5.17: Rez	eptur der Betonmischung	188
Tabelle 5.18: Übe	ersicht der Details aller 22 Messungen	189
Tabelle 5.19: Klin	kerphasen	189
Tabelle 6.1: Misc	hungsrezeptur für den Oberbeton (Einsatz in der ersten Demonstrationsstrecke)	198
Tabelle 6.2: Misc	hungsrezeptur für den Unterbeton (Einsatz in der ersten Demonstrationsstrecke)	198
Tabelle 6.3: Mis unbewehrte E	schungsrezeptur für den Beton der zweiten Demonstrationsstrecke für die bewehrte und die Bauweise	199
Tabelle 6.4: Besc	chaffte und verbrauchte Menaen der im Vorhaben BF 4.0 im IWB-Mischtechnikum verarbeiteten	
Gesteinskörn	ungen, Zemente und LP-Bildner	199
Tabelle 6.5: Mate	erialverbrauch 2020/21	200
Tabelle 6.6: Beisp (2015)	piel für einen Waschbeton Informationszentrum Beton GmbH "Fahrbahndeckenbeton für Straßen"	202
Tabelle 6.7: Beisp	oiel für einen Waschbeton InformationsZentrum Beton GmbH "Fahrbahndeckenbeton für Straßen" ۵	203
Tabelle 6.8: Z	Zusammensetzung der Komponenten der Ausgangsrezeptur für einen Waschbeton	221
Tabelle 6.9: Z	Zusammensetzuna der Komponenten der Ausaanasrezeptur für einen Unterbeton	221
Tabelle 6.10:	Siebanalvse der Gesteinskörnunasklasse 0/4	222
Tabelle 6.11:	Siebanalvse der Gesteinskörnunasklasse 0/2	222
Tabelle 6.12:	Siebanalvse der Gesteinskörnunasklasse 5/8	223
Tabelle 6.13:	Siebanalvse der Gesteinskörnungsklasse 8/16	223
Tabelle 6.14:	Siebanalvse der Gesteinskörnungsklasse 16/22	223
Tabelle 6.15:	Rohdichte/W24/Porosität der untersuchten Gesteinskörnungen	226
Tabelle 6.16:	Feinanteil der einzelnen Gesteinskornklassen	226
Tabelle 6 17	Zusammenstellung der mit dem IPC-Verfahren hestimmten Packungsdichten	227
Tabelle 6 18	Mit dem Laserbeuger \$3500 erfasste Partikelarößenverteilung des Zements und des zur	/
Mischungsop	 timierung eingesetzten Kalksteinmehls 	227

Tabelle 6.19: Aus der Normsteife ermittelte Werte zur experimentellen Packungsdichte	228
Tabelle 6.20: Sättigungsdosierung des Fließmittels für den Zement CEM I 42,5 N	229
Tabelle 6.21: Sättigungsdosierung des Fließmittels für das Kalksteinmehl KSM-Easyflow	229
Tabelle 6.22: Ausgangsrezeptur des Waschbetons in EXCEL-Datei dargestellt und bewertet	230
Tabelle 6.23: Ausgangsrezeptur des Unterbetons in EXCEL-Datei dargestellt und bewertet	230
Tabelle 6.24:Gegenüberstellung der Fehlerquadrate der Ausgangsrezeptur und der Fehlerquadrate sieblinien- optimierten Mischungsrezeptur für den Unter- und Oberbeton	der 238
Tabelle 6.25:GegenüberstellungderFehlerquadratederAusgangsrezepturundderFehlerquadratepackungsdichteoptimiertenMischungsrezeptur für den Unter- und OberbetonOberbetonImage: Comparison of the second	der 238
Tabelle 6.26: Gegenüberstellung der Frischbetoneigenschaften der hergestellten Fahrbahndeckenbetone	240
Tabelle 6.27: Luftporengehalte der Fahrbahndeckenbetone	241
Tabelle 6.28:Arbeitsthese Schwerlastservogetriebe für den 1,25 m³ Doppelwellenmischer, Stand März 3und prä-sentiert im Rahmen des 3. AG Treffens	2018 246
Tabelle 6.29: Auszug Lastenheft der zu erfassenden Mischparameter	247
Tabelle 6.30: Gegenüberstellung der mittels LP-Topf und SAM gemessenen Luftporengehalte für die beiden Bildner PANTAPOR 66K und PANTAPOR 2020	<i>LP-</i> 261
Tabelle 6.31: Ausgangswerte der Grundeinstellung und Messergebnisse für den Unter- und Oberbeton	282
Tabelle 6.32: Betonzusammensetzung.	349
Tabelle 6.33: Auswertung des dynamischen und statischen E-Moduls unter Angabe von Position, Mittelwert (N Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n)	/W), 352
Tabelle 6.34: Auswertung der Zug- und Spaltzugfestigkeit (untere Randfaser) unter Angabe von Position, Mittel (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n).	wert 352
Tabelle 6.35: Betonzusammensetzung für den zweiten Versuch	356
Tabelle 6.36: Statistische Parameter zu den Abweichungen zwischen den Profilmessungen vom 26. und 29.08.2	.019.
Tabella 6.27: Ergebnicco dor 4 Motor Lattoncimulation, Das Vorzoichon in der Spalto, Abweichung" gibt an	
sich um eine Abweichung unterhalb der virtuellen Latte handelt oder eine Frhebung über deren Niveau.	
Tabelle 7.1: Parameter des Frischbetonmodells	386
Tabelle 7.2: Überblick über verwendete Symbole und deren Bedeutung	395
Tabelle 7.3: Überblick über die untersuchten Klimata (links) und Betonrezeptur (rechts)	396
Tabelle 7.4: Funktionelle Daten.	407
Tabelle 7.5: Daten zur Qualitätsanalyse.	407
Tabelle 7.6: Definition eines Datensatzes für die Nachbearbeitung	421
Tabelle 8.1: : Abschätzung der verfahrenstechnisch/mechanischen Parameter bei Drehzahlerhöhung	456
Tabelle 8.2: Beobachtungen der Datengualität hinsichtlich der Rückverfolgbarkeitsanalyse.	508
Tabelle 8.3: Auszug aus den Mischungsberechnungen der beiden Demonstrationsbaustellen unter Angabe Bauweise	der 509
Tabelle 8.4: Auswertung des dynamischen und statischen E-Moduls unter Angabe von Bohrkerndurchme Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl der Prüfkörper (n)	sser, 512
Tabelle 8.5: Auswertung der zentrischen Zugfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit unter Angabe Bohrkerndurchmesser, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl Prüfkörper (n)	von der 512
Tabelle 8.6: Auswertung der Druckfestigkeit, ermittelt an der oberen und unteren Randfaser unter Angabe Bohrkerndurchmesser, Mittelwert (MW), Standardabweichen (Stabw.), Variation (Var.) und Anzahl Prüfkörper (n).	von der 513

14 LITERATURVERZEICHNIS

[AASHTO 2010]	AASHTO, "Standard Practice for Accepting Pavement Ride Quality When Measured Using Inertial Profiling Systems. AASHTO Designation R 54-10.," American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C., 2010.
[Abanda et al. 2017]	F. Abanda, J. Tah und F. Cheung, "BIM in off-site manufacturing for buildings," <i>Journal of Building Engineering</i> , pp. 89 - 102, 2017.
[ACPA 2002]	American Concrete Pavement Association , "The International Roughness Index (IRI): What is it? How is it Measured? What Do You Need to Know About it?," ACPA, Skokie, IL, 2002.
[Andreasen et al. 1930]	A.H.M. Andreasen, J. Andersen J., "Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)", in: Kolloid-Zeitschrift 50, S.217–228, 1930.
[Applanix 2019]	Applanix, "Datasheet POS LV," 2019. [Online]. Available: https://www.applanix.com/downloads/products/specs/POS-LV-Datasheet.pdf.
[ARS 2006]	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Sachgebiet 6.1 und 6.2 Straßenbaustoffe: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau - ARS Nr. 12, 2006.
[Balzer 2018]	M. Balzer, "Super Air Meter - Untersuchung der Wirkung von Luftporenbildnern bei der Herstellung von Straßenbetonen", BSc-Arbeit, Universität Stuttgart, 2018.
[Banfill et al. 2011]	P. Banfill, M. Teixeira und R. Craik, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," <i>Cement and Concrete Research</i> , Bd. 9, pp. 932-941, 2011.
[Bargstaedt 2015]	HJ. Bargstaedt, "Challenges of BIM for Construction Site Operations", <i>Procedia Engineering</i> , pp. 52 - 59, 2015.
[Baumert 2012]	Chr. Baumert, "Rheometrische Mischprozessführung - Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften", Dissertation TU Darmstadt, 2012.
[Beckhaus 2002]	K. Beckhaus, "Hochleistungsbeton für Verkehrsflächen", Dissertation TU München, 2002.

- [BE 341 1994]BRITE/EURAM project BE 3415 "Surface properties of concrete roads in accord-
ance with traffic safety and reduction of noise", November 1994.
- [Beitzel et al. 2003] H. Beitzel, Y. Charonnat, M. Beitzel, "RILEM TC 150-ECM Assessment and classification of performance mixers", Materials and Structures, S250-264, 36, RILEM Publications SARL, 2003.
- [BMVI 2016]BundesministeriumfürVerkehrunddigitaleInfrastruktur:"Bundesverkehrswegeplan 2030". BMVI, 2016.
- [Bockius 2018]P. Bockius, "Gyrator Parameterstudie zum Verdichtungsverhalten von steifen
Betonen", Bachelorarbeit am IWB, Universität Stuttgart, 2018
- [Bornemann 2005]R. Bornemann, "Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und
Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone", Dissertation Universität Kassel, 2005.
- [Bottke 2016]R. Bottke, "Voraussetzung für zuverlässige Messwerte des Luftgehaltes von
Frischbeton mit Luftgehaltsprüfer nach dem Druckausgleichsverfahren nach DIN
EN 12350 (Pressure air meter, ASTM C231 Type B)", in: BFT (2016) Heft 5, S. 2-6.
- [Bottke 2021]R. Bottke, "Verfahren und Gerät zur Untersuchung von Frischbeton mit künstlich
eingeführten Luftporen", Offenlegung des Patentprüfungsantrags DE 10 2020 00
572 A1 2021.07.29, 2021.
- [Budur 2018]Budur, Pinar: Eigenüberwachung und Prüfung der Frischbetoneigenschaften von
Straßen- und Kappenbeton. Masterarbeit am IWB gemeinsam mit der Fa.
Leonhard Weiss, Universität Stuttgart, 2018.
- [Bradley et al. 2016] A. Bradley, H. Li, R. Lark und S. Dunn, "BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective," *Automation in Construction*, pp. 139 152, 2016.
- [Breyer et al. 2009] G. Breyer, J. Litzka, J. Steigenberger: "Die Betonstraße ist eine nachhaltige Bauweise mit Zukunft", zement und beton, Heft 2, 2009.
- [Cable t al. 1999] J. Cable, L. McDaniel und R. Steffes, "Evaluation of Paver Vibrator Frequency Monitoring and Concrete Consolidation," 1999.
- [Cazaliu et al. 2009] B. Cazacliu, N. Roquet, "Concrete mixing kinetics by means of power measurement", in: Cement and Concrete Research, 39, S. 182-194, 2009.
- [Chang et al. 2001]P.-K. Chang, Y.-N. Peng, "Influence of mixing techniques on properties of high
performance concrete", Cement and Concrete Research, 31 (1), S. 87-95, 2001.

[Cervera et al. 1999]	M. Cervera, J. Oliver und T. Prato, "Thermo-Chemo-Mechanical Model for Concrete. I: Hydration and Aging," <i>Journal of Engineering Mechanics</i> , pp. 1018-1027, September 1999.
[Cervera et al. 2000]	M. Cervera, J. Oliver und T. Prato, "Simulation of Construction of RCC Dams. I: Temperature and Aging," <i>Journal of Structural Engineering</i> , Bd. 126, pp. 1053-1061, 2000.
[Dallasega 2018]	P. Dallasega, "Industry 4.0 Fostering Construction Supply Chain Management: Lessons Learned From Engineer-to-Order Suppliers," <i>IEEE Engineering Management Review</i> , pp. 49-55, 2018.
[David et al. 2015]	D. K. David, K. Merritt, G. K. Chang, J. L. Rutledge, "Best Practices for Achieving and MeasuringPavement Smoothness, A Synthesis of State-of-Practice (Final Report 550)," Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, Louisiana , 2015.
[DGZfP B4]	DGZfP Merkblatt B4. "Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile", 1999.
[Dils et al. 2012]	J. Dils, G. D. Schutter und V. Boel, "Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review," <i>Materials and</i> <i>Structures</i> , Bd. 45, pp. 1673-1683, 5 2012.
[DIN EN 12504]	DIN EN 12504-4:2004-12 "Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit", 2004.
[Eastman et al. 2011]	C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks und K. Liston, "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors", Wiley, 2011.
[Eickschen et al. 1998]	E. Eickschen, E. Siebel, "Einfluss der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Betonstrßaßen", Beton, Jahrg. 48, Heft 9, S. 580-586, 1998.
[FE32.0054 2012]	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: "Erhaltungsbedarfsprognose (BVWP) 2016 – 2030 der Bundesfernstraßen, Pavement Management System". https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/erhaltungsbedarfsprognose- pms.html (Stand 25.11.2021).
[FGSV 2004]	"FGSV-Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton", FGSV Verlag GmbH, 2004.

[FGSV 2009]	FGSV, Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen (TP Eben - Berührungslose Messungen), Köln: FGSV Verlag GmbH, 2009.
[Fiala 1999]	H. Fiala, "Aluminiumreaktion in Beton," Verlag Bau+Technik GmbH, Bd. beton 10/1999, p. 556, 1999.
[FhG 2019]	Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM, "PAVEMENT PROFILE SCANNER PPS / PPS-PLUS," 2019. [Online]. Available: https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/product- information/OF/MTS/Pavement-Profile-Scanner-PPS.pdf.
[Gailing 1996]	R. Gailing, "Bauschäden an Verkehrswegen", Straßen- und Tiefbau Heft 3, 1996.
[Garrecht et al. 2012a]	H. Garrecht, V. Malárics, A. Karden, Chr. Baumert, A. Schließer, "Potenziale einer rheologiege-stützten Mischprozessführung feinstoff- und zusatzmittelreicher sowie wasserarmer Betone" in: Ludwig, H.M. (Ed.): IBAUSIL 18, Tagungsbericht Band 1, 2012.
[Garrecht et al. 2012b]	H. Garrecht, Chr. Baumert, A. Karden, "Three-stage concept for the development, production and quality control for SCC", in: BFT-International, 07, S. 52-58, 2007.
[Garrecht et al. 2017]	H. Garrecht, A. Schließer, Chr. Baumert, "Einfluss der Optimierung von Mischungszusammenset-zung und Mischregime auf den Ressourceneinsatz und die Leistungsfähigkeit fließfähiger Betone", in: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. DrIng. Rolf Breitenbücher, Ruhr-Universität Bochum, 2017.
[Geisenhanslücke 2005]	C. Geisenhanslüke, "Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton", in: Tagungsband zur Veranstaltung 45. Forschungskolloquium des DAfStb vom 67. 10. 2005 in Wien, S. 65-68, 2005.
[Gencaslan 2018]	EA. Gencaslan, "Untersuchung der Luftporen in Frischbeton mit dem Air Void Analyzer", Bachelorarbeit am IWB, Universität Stuttgart, 2018.
[Großmann et al. 2009]	A. Großmann, S. Villaret: "Restwertermittlung von Asphalt- und Betonstraßen"; in: Straße + Autobahn, Heft 6; Kirschbaum Verlag GmbH; Bonn; 2009.
[Grove et al. 2006]	J. Grove, B. Steffes, M. Anderson-Wilk, "Using the Air Void Analyzer for Real-Time Quality Control Adjustments in the Field", National Concrete Pavement Technology Center, Report, https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/ava.pdf, 2006.

- [Hashagen 2021] M. Hashagen, "Einfluss ausgewählter Mischtechnikparameter auf die Partikelverteilung von Feinstoffen in Beton", Masterarbeit am IWB, Universität Stuttgart, 2021.
- [Huber et al. 2005] J. Huber, P. Schießl, "Chemisches Schwinden des Oberbetons im Zweischichtsystem von Betonfahrbahndecken", Forschungsbericht F2025, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2005.
- [Hüsken 2008]G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, "A new mix design concept for earth-moist concrete:
A theoretical and experimental study", in: Cement and Concrete Research, 38, S.
1246-1259, 2008.
- [Hüttl 2000]R. Hüttl, "Der Wirkungsmechanismus von Steinkohlenflugasche als
Betonzusatzstoff", Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000.

[Jezquel et al. 2009] P.H. Jezquel, V. Colliin, "Mixing of concrete or mortars: Distributive aspects", Cement and Condrete Research, 39 (3), S. 678-686, 39 (8), 2009.

- [Juez et al. 2017] J. M. Juez, R. Artoni und B. Cazacliu, "Monitoring of concrete mixing evolution using image analysis," *Powder Technology*, Bd. 305, pp. 477-487, 1 2017.
- [Khalid 2021]S. Khalid, "Gleitschalungsfertiger Einsatz im Betonfahrbahnbau und einherge-
hende betontechnologische Besonderheiten", Masterarbeit am IWB, Universität
Stuttgart, 2021.
- [Kraus 2020]F. Krauss, "Untersuchung des Einflusses der Mischtechnik auf rheologische
Eigenschaften von Betonen anhand einer selbstentwickelten Rezeptur",
Masterarbeit am IWB Universität Stuttgart, 2020.
- [Krüger et al. 2011] M. Krüger, C. Große, F. Lehmann, H.-W. Reinhardt, "Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall – das FreshCon-System", Messtechnik im Bauwesen, A61029, Februar 2011.
- [Landau et al. 2002] H. Landau, U. Vollath und X. Chen, "Virtual Reference Station Systems," *Journal of Global Positioning Systems*, Bd. 1, Nr. 2, pp. 137-143, 2002.
- [Larrard 1999]F. de Larrard, "Concrete Mixture-Proportioning A Scientific Approach", Modern
Concrete Technology Series, No. 9, E & FN SPON, London, 1999.
- [Lédée et al. 2004] V. Lédée, F. de Larrard, T. Sedran, F. Brochu, "Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris Cedex, 2004.

- [Leykauf et al. 2001] G. Leykauf, D. Birmann, "Langzeitverhalten von Betondecken mit über 20 Jahren Legedauer", Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 807, 2001.
 [Linquist et al. 2018] W. Lindquist, R. Montney, "Comparison of spacing factors as measured by the air-void analyzer and ASTM C457", in: International Journal for Pavement
- [Lothenbach et al. 2006] B. Lothenbach, F. Winnefeld, "Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement," *Cement and Concrete Research*, pp. 209-226, Januar 2006.

Engineering, Vol. 20 (2018) 2, S. 183-190, 2018.

- [Lui et al. 2015] Z. Lui, W. Hanssen, B. Meng, "Characterisation of Air Void Systems in Concrete", in: Magazin of Concrete Research, 2015.
- [Luzio et al. 2009a] G. Di Luzio und G. Cusatis, "Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete. I: Theory," Cement and Concrete Composites, Bd. 31, pp. 301-308, 2009.
- [Luzio et al. 2009b] G. Di Luzio und G. Cusatis, "Hygro-thermo-chemical modeling of highperformance concrete. II: Numerical implementation, calibration, and validation," Cement and Concrete Composites, Bd. 31, pp. 309-324, 2009.
- [Macht et al. 2007] J. Macht, P. Nischer, "Mehlkornoptimierung zur Verbesserung der Festbetongüte", in: BFT Heft 3, S. 22- 33, 2007.

[Maerschalk et al. 2014] G. Maerschalk, G. Krause, "Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern". Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 878, Bonn 2004.

- [mendhak 2021] mendhak, *Smartphone App: gpslogger*, https://github.com/mendhak/gpslogger, 2021.
- [Metzger 2016] T. Metzger, "Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern", 5. Auflage, Vincentz Network, 2016.

[Mohr 2018] N.B. Mohr, "Super LP-Topf nach Bottke - Untersuchung der Wirkung von Luftporenbildnern bei der Herstellung von Straßenbetonen", Bachelorarbeit IWB Universität Stuttgart, 2018.

- [Nelson et al. 1994] Nelson, P. M., and Phillips, S. M., "Quieter road surfaces", TRL Annual Review, Transportation Research Laboratories, UK, 1994.
- [Nischer 1995] P. Nischer, "Hochleisuntgsbeton für den Straßen- und Brückenbau", BMWI, Straßenforschunug, Heft 441, 1995.

[Nikolaides 2014] A. Nikolaides, Highway Engineering - Pavements, Materials and Control of Quality, Boca Raton: CRC Press, 2014.

[Oesterheld et al. 2019] R. Oesterheld, M. Peck, S. Villaret: "Straßenbau heute: Betondecken". Verlag Bau + Technik, 2018.

[Ötztürk 2006] Ansteifverhalten und Festigkeitsentwicklung von zementgebundenen Baustoffen – Eine zerstörungsfreie Messmethode auf der Basis von Ultraschall und Reife. Dissertation Universität Darmstadt, 2006.

[PCT/EP 2016]PCT Patentanmeldung PCT/EP2016/081379 WO 2017/103067, "Verfahren zur
Betonherstellung – Bestimmung des Losbrechmoments" 2017.

[Pfeifer 2008]L. Pfeifer: "Betonfahrbahnen - eine erfolgreiche Bauweise: Erfahrungen und
Entwicklungen", Straße und Autobahn, Heft 06, 2008.

[Rauh et al. 2008] J. Rauh und M. Mössner-Beigel, "Tyre simulation challanges," Bd. 46, Nr. 1, pp. 49-62, 2008.

[RDO Beton]RDO Beton 09, "Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung von
Betondecken im Oberbau", FGSV-Verlag GmbH.

[Reinhardt et al. 2005] H.-W. Reinhardt und C.U. Große (Ed.): Advanced testing of cement based materials during setting and hardening. Final report of the RILEM TC 185-ATC. RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, ISBN 978-2-912143-81-5, 2005.

[Reiterer et al. 2013] A. Reiterer, M. Dambacher, I. Maindorfer, H. Höfler, D. Ebersbach, C. Frey, S. Scheller und D. Klose, "Straßenzustandsüberwachung in Sub-Millimeter," Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, pp. 78-85, 2013.

[Reschke 1999] T. Reschke, E. Siebel, G. Thielen, "Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeit-und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton", in: Beton 49, 12, S. 719-724, 1999.

[Riffel 2012]S. Riffel, "Verkehrsflächen aus Beton: Grinding – eine lärmarme und griffige
Textur", Straßen und Tiefbau, Heft 12, 2011.

[Roussel 2007] N. Roussel, "Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes", in: Materials and Structures, 40, S. 1001-1012, 2007.

[RStO] RStO 12, "Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen", FGSV-Verlag GmbH.

[RTA 2018]	Real Time Automation, "OPC UA Overview," 18 04 2018. [Online]. Available: https://www.rtaautomation.com/technologies/opcua/.
[Sayers et al. 1986]	M. W. Sayers, T. D. Gillespie und C. A. V. Queiroz, "The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements," <i>Transportation Research Record</i> , Nr. 1084, pp. 76-85, 1986.
[Scheurer 2021]	J. Scheurer, "Untersuchungen zur automatischen Bestimmung von Luftporen- kennwerten am Festbeton", Masterarbeit IWB Universität Stuttgart, 2021.
[Scheurer 2018]	J. Scheurer, "Grundlagen für ein Verfahren zur Bewertung von Luftgehaltsprüfern für Straßenbeton", Bachelorarbeit IWB Universität Stuttgart, 2018.
[Schießl et al. 2000]	P. Schießl, K. Beckhaus, "Beton für den Bau von Verkehrswegen
[Schrammel 2020]	AM. Schrammel, "Packungsdichteabhängige Konsistenzbestimmung von LVB und SVB", Masterarbeit IWB Universität Stuttgart, 2020.
[Skalecki et al. 2020a]	P. Skalecki, S. Laicher, M. Wörner und O. Sawodny, "Observer Design for non- stationary oscillating Disturbances in Mixing Processes," <i>IFAC-PapersOnLine</i> , 2020.
[Skalecki et al. 2020b]	P. Skalecki, S. Rechkemmer und O. Sawodny, "Process and Data Modeling for System Integration – towards Smart Concrete Pavement Construction," in 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2020.
[Skalecki et al. 2020c]	P. Skalecki, S. Idrizi, M. Schreiner, F. Lehmann und O. Sawodny, "Hydration Modeling for Improved Curing Process Prediction in Concrete Construction," in 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2020.
[Skalecki et al. 2021]	P. Skalecki, M. Sesselmann, S. Rechkemmer, T. Britz, A. Großmann, H. Garrecht und O. Sawodny, "Process Evaluation for Smart Concrete Road Construction: Road Surface and Thickness Evaluation Using High-Speed LiDAR Technology.," Automation, Bd. 2, Nr. 1, pp. 31-47, 2021.
[Skarabis 2020]	J. Skarabis, "Anwendung der Mikroindentation zur Gefügeuntersuchung von Fahrbahnbetonen, Dissertation TU München, 2020.
[Sladakovic 2020]	Chr. Sladakovic, "Parameterstudie zum Messverhalten von Beton mit dem Gyrator", Bachelorarbeit IWB Universität Stuttgart, 2020.

[Springenschmid 1985]	R. Springenschmid, "Betontechnische Fragen des Fahrbahndeckenbaus. Straße und Autobahn, Heft 8, 1983.
[Stengel et al. 2011]	T. Stengel, D. Lowke, P. Schießl, Chr. Gehlen, "UHPC mit alternativen Zusatzstoffen – Rheologie und Faserverbund", in: Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 1, S.31-38, 2011.
[Stöckert 2012]	Stöckert, U.: Geräuscharme Fahrbahndecken aus Beton. In: Verkehr und Um- welt, 3/2012, S. 5
[This 2002]	
[Thomas et al. 2011]	J. J. Thomas, J. J. Biernacki, J. W. Bullard, S. Bishnoi, J. S. Donaldo, G. W. Scherer und A. Luttge, "Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development," <i>Cement and Concrete Research</i> , pp. 1257-1278, Februar 2011.
[TL Beton-StB-07]	"Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton", (TL Beton-StB – Edition 2007) – Translation 2012 – 891 E, 2012.
[TL Gestein-StB]	"Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau", (TL Gestein-StB) – (Ausgabe 2004/Fassung 2018) – 613, 2018.
[Tracar 2021]	Traccar Ltd, Smartphone App: Traccar Client, https://www.traccar.org/client/, 2021.
[UBA 2000]	Jahresbericht 1999. Berlin, 2000
[UBA 2013]	Rückert-John, J. Bormann, I. John, R. Umweltbewusstsein in Deutschland 2012. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, 2013
[UBA 2014]	Lärmmindernde Fahrbahnbeläge - Ein Überblick über den Stand der Technik. TEXTE 20/2014, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, 2014
[Ueckermann et al. 2008]	A. Ueckermann und B. Steinauer, "The Weighted Longitudinal Profile. A New Method to Evaluate the Longitudinal Evenness of Roads.," <i>Road Materials and Pavement Design</i> , Bd. 9, Nr. 2, pp. 135-157, 2008.
[Ünal 2021]	E. Ünal, "Optimierter Mischungsentwurf für Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung", Masterarbeit IWB Universität Stuttgart, 2021.

[Ünal 2018]	E. Ünal, "Die Eigenschaften der Kornform in der Packungsdichte für die Betonherstellung", Bachelorarbeit IWB Universität Stuttgart, 2018.
[VIF 2015]	R. Spielhofer et al.,"Optimierung von Grinding & Grooving von Betonfahrbahndecken - GROOVE", AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 2018 (https://projekte.ffg.at/anhang/5cfa1a7fea870_Groove%20Ergebnisbericht.pdf)
[Wallevik et al. 2011]	O.H. Wallevik, J. E. Wallevik, "Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes", Cement and Concrete Research, S. 1279-1288, 41, (12), Elsevier, 2011.
[Wan et al. 2016]	L. Wan, R. Wender, B. Liang und G. Cusatis, "Analysis of the behavior of ultra high performance concrete at early age," <i>Cement and Concrete Composites</i> , pp. 120-135, August 2016.
[Wenzl 2007]	P. Wenzl, "Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von texturierten Verkehrsflächen aus Beton", Dissertation, TU München, 2007.
[Wieland et al. 2018]	M. Wieland und M. Sesselmann, "Plattenspezifische 3D-Oberflächenanalyse im Kontext mit der rechnerischen Dimensionierung und Restsubstanzbewertung von Betonfahrbahndecken.," Straße und Autobahn, Bd. 6, pp. 447-458, 2018.
[Williams et al. 1999]	D.A. Williams, A.W. Saak, H.M. Jennings, "The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste", Cement and Concrete Research, 29 (9), S. 1491 - 1496, 1999.
[WU 2019]	J. Wu, Systematische Analyse und Optimierung des Feuchtemesssungsprozesses der Gesteinskörnung bei der Betonmischanlage, Bacheelorarbeit, Hochschule Ravensburg-Weingarten, Liebherr Mischtechnik GmbH, 2019.
[Zi et al. 2019]	Z. Li und G. Cao, "Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state," <i>Cement and Concrete Research</i> , pp. 217-226, 2019.
[Zhou et al. 2020]	H. A. Zhou, A. Gannouni, T. Otte, J. Odenthal, A. Abdelrazeq und F. Hees, "Towards a Digital Process Platform for Future Construction Sites," in 2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation (ITU K), 2020.
[ZTV Beton-StB 07]	ZTV Beton-StB-07, "Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahbahndecken aus Beton", FGSV-Verlag GmbH.

A Manufacturer-Independent Digital Process Platform for Future Construction Sites. **Otte, Thomas, et al. 2020.** s.l. : IEEE, 2020. 2020 14th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT).

AASHTO. 2010. Standard Practice for Accepting Pavement Ride Quality When Measured Using Inertial Profiling Systems. AASHTO Designation R 54-10. Washington, D. C. : American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2010.

Abanda, F.H., Tah, J.H.M. und Cheung, F.K.T. 2017. BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*. 2017, S. 89 - 102.

Aluminiumreaktion in Beton. Fiala, Hannes. 1999. 1999, Verlag Bau+Technik GmbH, Bd. beton 10/1999, S. 556. American Concrete Pavement Association . 2002. *The International Roughness Index (IRI): What is it? How is it Measured? What Do You Need to Know About it?* Skokie, IL : ACPA, 2002.

Applanix.2019.DatasheetPOSLV.[Online]2019.https://www.applanix.com/downloads/products/specs/POS-LV-Datasheet.pdf.

Banfill, P.F.G., Teixeira, M.A.O.M. und Craik, R.J.M. 2011. Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research.* 41, 2011, Bd. 9, S. 932-941.

Bargstaedt, Hans-Joachim. 2015. Challenges of BIM for Construction Site Operations. *Procedia Engineering.* 2015, S. 52 - 59.

Bradley, Alex, et al. 2016. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction.* 2016, S. 139 - 152.

Cable, J.K., McDaniel, L. und Steffes, R. 1999. *Evaluation of Paver Vibrator Frequency Monitoring and Concrete Consolidation.* Transportation, Department of. 1999.

Cervera, Miguel, Oliver, Javier und Prato, Thomás. 1999. Thermo-Chemo-Mechanical Model for Concrete. I: Hydration and Aging. *Journal of Engineering Mechanics.* September 1999, S. 1018-1027.

Characterization of the granular-to-fluid state process during mixing by power evolution in a planetary concrete mixer. **Cazacliu, Bogdan und Legrand, Jack. 2008.** 2008, Chemical Engineering Science, Bd. 63, S. 4617-4630. ISSN: 0009-2509.

Chen, LiJuan und Luo, Hanbin. 2014. A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction.* 2014, S. 64 - 73.

Concrete mixing kinetics by means of power measurement. **Cazacliu, B. und Roquet, N. 2009.** 2009, Cement and Concrete Research, Bd. 39, S. 182-194. ISSN: 0008-8846.

Dallasega, P. 2018. Industry 4.0 Fostering Construction Supply Chain Management: Lessons Learned From Engineer-to-Order Suppliers. *IEEE Engineering Management Review.* 2018, S. 49-55.

David K. Merritt, D. K., Chang, G. K. und Rutledge, J. L. 2015. *Best Practices for Achieving and MeasuringPavement Smoothness, A Synthesis of State-of-Practice (Final Report 550).* Baton Rouge, Louisiana : Louisiana Transportation Research Center, 2015.

Eastman, C., et al. 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors.* s.l. : Wiley, 2011.

FGSV. 2009. Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und *Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen (TP Eben - Berührungslose Messungen).* Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2009.

—. 2009. Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen (TP Eben - Berührungslose Messungen). Köln : FGSV Verlag GmbH, 2009.

-. 2018. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB). Köln : FGSV Verlag GmbH, 2018.

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM. 2019. CLEARANCE PROFILE SCANNER CPS.[Online]2019.https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/product-information/OF/MTS/Clearance-Profile-Scanner-CPS.pdf.

—. 2019. PAVEMENT PROFILE SCANNER PPS / PPS-PLUS. [Online] 2019. [Zitat vom:] https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/product-information/OF/MTS/Pavement-Profile-Scanner-PPS.pdf.

Fraunhofer IPM. 2019. Clearance Profile Scanner CPS. 2019.

Herrmann, C., Großmann, A. und Ueckermann, A. 2019. Erweiterung des Einsatzes des bewerteten Längsprofils auf bauvertragliche Anwendungen und Vergleich mit dem herkömmlichen Abnahmeverfahren. FE 04.0286/2014/DGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. 2019.

Hydration Modeling for Improved Curing Process Prediction in Concrete Construction. **Skalecki, Patric, et al. 2020.** s.l. : IEEE, 2020. 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). *Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete. I: Theory.* **Di Luzio, Giovanni und Cusatis, Gianluca. 2009.** 2009, Cement and Concrete Composites, Bd. 31, S. 301-308. ISSN: 0958-9465.

Hygro-thermo-chemical modeling of high-performance concrete. II: Numerical implementation, calibration, and validation. **Di Luzio, Giovanni und Cusatis, Gianluca. 2009.** 2009, Cement and Concrete Composites, Bd. 31, S. 309-324. ISSN: 0958-9465.

Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. Dils, J., Schutter, G. De und Boel, V. 2012. s.l. : Springer Science and Business Media LLC, 5 2012, Materials and Structures, Bd. 45, S. 1673-1683.

In-mixer measurements for describing mixture evolution during concrete mixing. **Cazacliu, Bogdan. 2008.** s.l. : Elsevier BV, 12 2008, Chemical Engineering Research and Design, Bd. 86, S. 1423-1433.

Landau, H., Vollath, U. und Chen, X. 2002. Virtual Reference Station Systems. *Journal of Global Positioning Systems*. 2002, Bd. 1, 2, S. 137-143.

Längsebenheitsauswerteverfahren: Bewertetes Längsprofil. Maerschalk, Günther, Ueckermann, Andreas und Heller, Slawomir. 2008. 2008, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bd. Straßenbau.

Li, Zhuguo und Cao, Guodong. 2019. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research.* 2019, S. 217-226.

Lothenbach, Barbara und Winnefeld, Frank. 2006. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research.* Januar 2006, S. 209-226.

mendhak. 2021. Smartphone App: gpslogger. *Smartphone App: gpslogger.* s.l. : https://github.com/mendhak/gpslogger, 4 2021. accessed 2021-04-08.

Monitoring of concrete mixing evolution using image analysis. Juez, Jaime Moreno, Artoni, Riccardo und Cazacliu, Bogdan. 2017. s.l. : Elsevier BV, 1 2017, Powder Technology, Bd. 305, S. 477-487.

Nikolaides, A. 2014. *Highway Engineering - Pavements, Materials and Control of Quality.* Boca Raton : CRC Press, 2014.

Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena. **Cervera, M., et al. 2002.** 2002, Computers & Structures, Bd. 80, S. 1511-1521. ISSN: 0045-7949.

Observer Design for non-stationary oscillating Disturbances in Mixing Processes. **Skalecki, Patric, et al. 2020.** 2020, IFAC-PapersOnLine. [accepted].

Plattenspezifische 3D-Oberflächenanalyse im Kontext mit der rechnerischen Dimensionierung und Restsubstanzbewertung von Betonfahrbahndecken. **Wieland, M. und Sesselmann, M. 2018.** 2018, Straße und Autobahn, Bd. 6, S. 447-458.

Process and Data Modeling for System Integration – towards Smart Concrete Pavement Construction. Skalecki, Patric, Rechkemmer, Sabrina und Sawodny, Oliver. 2020. s.l. : IEEE, 2020. 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII).

Process Evaluation for Smart Concrete Road Construction: Road Surface and Thickness Evaluation Using High-Speed LiDAR Technology. **Skalecki, P., et al. 2021.** 1, 2021, Automation, Bd. 2, S. 31-47.

Process Evaluation for Smart Concrete Road Construction:Road Surface and Thickness Evaluation Using High-Speed LiDAR Technology. **Skalecki, Patric, et al. 2021.** 2021, Automation, Bd. 2, S. 31–47. ISSN: 2673-4052.

Real Time Automation. 2018. OPC UA Overview. *www.rtaautomation.com.* [Online] 18. 04 2018. https://www.rtaautomation.com/technologies/opcua/.

Reiterer, A., et al. 2013. Straßenzustandsüberwachung in Sub-Millimeter. *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013.* 2013, S. 78-85.

Simulation of Construction of RCC Dams. I: Temperature and Aging. Cervera, Miguel, Oliver, Javier und Prato, Tomas. 2000. Journal of Structural Engineering, Bd. 126, S. 1053-1061.

The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. Sayers, M. W., Gillespie, T. D. und Queiroz, C. A. V. 1986. 1084, 1986, Transportation Research Record, S. 76-85.

The Weighted Longitudinal Profile. A New Method to Evaluate the Longitudinal Evenness of Roads. **Ueckermann, A. und Steinauer, B. 2008.** 2, 2008, Road Materials and Pavement Design, Bd. 9, S. 135-157.

Thomas, Jeffrey J., et al. 2011. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. *Cement and Concrete Research.* Februar 2011, S. 1257-1278.

Towards a Digital Process Platform for Future Construction Sites. **Zhou, Hans Aoyang, et al. 2020.** s.l. : IEEE, 2020. 2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation (ITU K).

Traccar Ltd. 2021. Smartphone App: Traccar Client. *Smartphone App: Traccar Client.* s.l.: https://www.traccar.org/client/, 4 2021. accessed 2021-04-08.

Tyre simulation challanges. Rauh, J. und Mössner-Beigel, M. 2008. 1, 2008, Bd. 46, S. 49-62.

Ueckermann, A. und Oeser, M. 2015. Approaches for a 3D assessment of pavement evenness data based on 3D vehicle models. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) Volume 2 Issue 2.* 2015, S. 68-80.

Wan, Lin, et al. 2016. Analysis of the behavior of ultra high performance concrete at early age. *Cement and Concrete Composites.* August 2016, S. 120-135.

Wu, Jiaqi. 2019. *Systematische Analyse und Optimierung des Feuchtemesssungsprozesses der Gesteinskörnung bei der Betonmischanlage.* s.l.: Bacheelorarbeit, Hochschule Ravensburg-Weingarten, Liebherr Mischtechnik GmbH, 2019.

Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall -- das FreshCon-System. Krüger, M., et al. 2011. 2011, Messtechnik im Bauwesen, Bd. A61029, S. 88-92.

15 ANHANG

- 15.1 ANLAGEN
 - 15.1.1 Anlage 1: BF4.0 WebApp/Übersicht Betonherstellung.pdf
 - 15.1.2 Anlage 2: BF4.0 WebApp/Übersicht Einbauprozess.pdf
 - 15.1.3 Anlage 3: BF4.0 WebApp/Übersicht Nachbearbeitung.pdf
 - 15.1.4 Anlage 4: BF4.0 WebApp/Übersicht Frischbetonprotokolle.pdf
 - 15.1.5 Anlage 5: BF4.0 WebApp/Übersicht Frischbetonprotokolle erfassen.pdf

15.2 VERSUCHSAUFBAUTEN

15.2.1 Entwicklung eines Labormischsystems zur Abbildung realer Mischsysteme

Neben der im Projekt verankerten Technikums-Mischanlage auf dem IWB Gelände sollen zur Untersuchung der Skalierbarkeit der Mischkonzepte sowie für weitergehende Entwicklungen ein neuer Labormischer realisiert werden. Dies bietet den Vorteil, dass unter minimalen Materialaufwand, neue Antriebs-, Sensor- und Mischkonzepte realisiert und unter dem gleichen herunterskalierten Mischregime erprobt werden können.

Hierzu wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der Fa. Liebherr-Mischtechnik GmbH (LMT) und dem ISYS auf Basis einer realmaßstäblichen Mischanlage das Mischregime auf den Labormaßstab herunterskaliert und realisiert. Neben den konstruktiven Anpassungen steht ein neues flexibles Steuerungssystem im Vordergrund, damit für die Versuche und Analysen im Rahmen des Forschungsvorhabens neue Mischroutinen und Sensoren mit minimalem Aufwand integriert werden können. Darüber hinaus wurde eine teil-automatisierte Beschickungseinrichtung konzipiert und konstruiert, um die Materialzugabe respektive die Materialströme in den Mischern und deren Zeitpunkte reproduzierbar durchzuführen.



Abbildung 15-1: Liebherr Labormischer DW0.06/100 (links) und teil-automatisierte Beschickungseinrichtung (rechts)

Vordergründig wird der Liebherr Labormischer DW0.06/100 zur Evaluation des Antriebsstrangs und zur Erprobung neuer Mischkonzepte eingesetzt. Dafür wurde der Antriebsstrang konstruktiv so optimiert, dass die Antriebselastizitäten, vor allem durch den Riementrieb, reduziert werden. Weiter kommt im Antriebsstrang ein Frequenzumrichter zum Einsatz, damit neben unterschiedlichen Drehzahlen auch Drehzahlprofile zur Bewertung der rheologischen Eigenschaften des erdfeuchten Fahrbahnbetons gefahren und die elektrischen Kenngrößen automatisiert mit aufgezeichnet werden können. Als Sensoren für den Labormischer wurden auf der mechanischen Seite eine hochauflösende Drehzahlmessung über Inkrementalgeber und eine Momentenmessung über die Reaktionskraft zwischen Getriebe und Mischertrog mit einer Pendelstütze gewählt. Auf der verfahrenstechnischen Seite kommt eine Feuchte- und Infrarottemperaturmessung zum Einsatz (vgl. Abbildung 15-2. Die Kombination aus diesem erweiterten Sensorpaket sowie der flexiblen Ansteuerung der Antriebe ermöglicht eine systematische Analyse der qualitätssensitiven Maschinenparameter und schafft eine zur Technikums-Mischanlage am IWB und der realmaßstäblichen Mischanlage der Fa. Schnorpfeil vergleichbare Datenbasis. Darüber hinaus werden im weiteren Fortschritt Methoden zur modellbasierten Rekonstruktion und Korrektur der Mischungsenergie sowie weiterführende Untersuchungen des Mischprozesses selbst angestrebt.



Abbildung 15-2: Aktorik und Sensorik am Labormischer DW0.06/100

Auf Basis der im Laborversuch gewonnenen Erkenntnisse und im Vergleich aus der gemeinsam erstellten Datenbasis werden die Ergebnisse auf die Baupraxis für das Gesamtsystem *Mischanlage* angepasst und transferiert. Weitere Details zu dem Aufbau und den Zielen entnehmen Sie dem Abschnitt 6.1.2.4.

15.2.2 Beschaffung, Installation und Inbetriebnahme einer realmaßstäblichen Doppelwellenmischanlage zur Entwicklung und Erprobung einer rheologiegestützten Mischprozessführung

Zur realmaßstäblichen Herstellung von Straßenbetonen und zur Entwicklung von Methoden zur rheologiegestützten Mischprozessführung konnte im Rahmen des Verbundvorhabens eine stationäre Technikumsmischanlage von Liebherr für die Aufstellung im Technikum des IWB beschafft und installiert werden. Die für die Umsetzung der Vorhabensziele erforderliche Mischanlage hat eine maximale Produktionsleistung von 1,25 m³ Frischbeton je Mischansatz. Das gesamte Aufnahmevermögen an Gesteinskörnung im Taschenreihensilo umfasst 70 m³ bei einer Anzahl von 4 Taschen für verschiedene Gesteinskörnungen. Abbildung 15-3 vermittelt einen Eindruck von der Anlagenaufstellung im Mischtechnikum. Im Zementsilo steht ein Silovolumen von 24 m³, wobei 2 Silokammern mit je 12 m³ zur Verfügung stehen. Für den Einsatz von Additiven können insgesamt 2 Zusatzmittel verwendet werden.

15.2.2.1 Umbau der Versuchshalle sowie Aufstellung und Inbetriebnahme der Mischanlage

Um die Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage im Technikum des IWB an der Universität Stuttgart aufstellen zu können, mussten umfassende und ursprünglich nicht vorhersehbare bauliche und anlagentechnische Maßnahmen vorgenommen werden. Hierbei wurden statisch konstruktive Ertüchtigungen erforderlich, um die erheblichen Lasten der Mischanlage, die sich aus dem Eigengewicht und den dynamischen Beanspruchungen des laufenden Betriebs der Mischanlage ergeben, aufnehmen zu können. So musste der unterhalb der Aufstellfläche befindliche Kellerbereich statisch wirksam verbessert werden, in dem ergänzende Fundamente zur Aufnahme zusätzlicher Stützen und Unterzüge nachträglich eingezogen werden musste. Desweiterem mussten komplizierte Durchbrüche in der Hallenaußenwand vorgenommen werden, um den Beschicker der Mischanlage zwischen den außenliegenden Taschensilos und der in der Halle befindlichen Mischanlage führen zu können. Umfassende Rohbauarbeiten erforderte auch die außenseitige Aufstellung der Taschensilos wie auch des Zementsilos ein. Während der Baumaßnahmen musste zudem festgestellt werden, dass die Silos unmittelbar an die alten und seit mehr als 20 Jahren stillgelegten unterirdischen Gesteinskornsilos angrenzen. Entsprechend mussten die Fundamente nach dieser Feststellung nochmals nachgegründet werden, um die hohen Lasten aus der Gesteinskorneinlagerung aufnehmen zu können.



Abbildung 15-3: Realmaßstäbliche mobile Betonmischanlage vom Typ Liebherr DW 1,25 im IWB-Technikum Pfaffenwaldring 4d an der MPA Universität Stuttgart – Taschenreihensilo mit 4 Gesteinskornkammern mit außen aufgestelltem Zementsilo (links) und Blick auf die hallenintegrierte Mischanlage (rechts)

Ferner musste es zur Aufbereitung des bei der Betonherstellung anfallenden Abwassers und zu dessen Einleitung in die öffentliche Kanalisation einer Abwasserreinigungsanlage, die in der Technikumshalle installiert werden musste. Der Einbau einer Abwasserreinigungsanlage erforderte, im Keller zwei große Auffangwannen in WU-Bauweise zu errichten. Die Abwasserreinigungsanlage wurde von Ecofrog beschafft und installiert. Um die Genehmigungsauflagen der Stadt Stuttgart zu erfüllen, muss die Abwasserreinigungsanlage folgende Anforderungen erfüllen:

- Sand- und Kiesreste automatisch auswaschen und grobe Gesteinskörnung abtrennen, max. Korngröße ca. 20mm
- Zementleimsuspensionen sind in einem Schmutzwasserbehälter zu puffern
- Feinanteile des Restwasser mittels (hydraulischer) Filterpresse verarbeiten, um trockene Filterkuchen zu realisieren
- Filtrat muss zur Vorreinigung von Mischern verwendet werden können
- Filtrat ist zur Neutralisation ebenfalls in einem Behälter zu puffern
- Klares Restwasser ist durch CO₂ außerhalb der Halle zu neutralisieren (pH-Wert zwischen 12 und 13)
- Lagerschrank der CO₂-Gasflaschen müssen außerhalb gesichert aufgestellt werden

- Maximaler Volumenstrom Schmutzwasser ca. 1m³/h, Tagesleistung max. 10 Stunden
- Betrieb der Anlage und der Filterpresse muss durch wissenschaftliche MitarbeiterInnen geleistet werden können
- Sicherstellung der Einhaltung der örtlichen Abwassergrenzwerten und Dokumentation der Abwasserqualität im laufenden Betrieb

Um die zu installierenden Anlagenkomponenten mit entsprechenden elektrischen Anschlussleistungen versorgen zu können, war es unerlässlich, eine komplett neue Elektroinstallation im Bereich der Schwach- und Starkstromversorgung in der Versuchshalle vorzunehmen. Hierzu wurde ein Elektrofachplanungsbüro beauftragt, die entsprechenden Ingenieurplanungen und die Ausschreibung vorzubereiten. Bereits im Erläuterungsbericht der Elektroplaner wurde ausgeführt, dass die gesamte Elektroinstallation einschließlich der Hallenbeleuchtung zwingend zu erneuern ist, um die Halle künftig als Mischtechnikum nutzen zu können.

So wurde eine Anschlussleistung unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren in Höhe von 450 kVA als notwendig erachtet, um sowohl die Doppelwellenmischanlage als auch die Abwasserreinigungsanlage mit den benötigten elektrischen Leistungsanforderungen versorgen zu können. Die Elektroinstallationen Starkund Schwachstrom (EDV-Netz) in der Halle waren komplett zu erneuern einschl. der Bereichsverteilung und der Allgemein- und Sicherheitsbeleuchtung. Dabei wurde die neue Bereichsverteilung für die erforderlichen Anschlüsse der neuen Liebherr-Betonmischanlage.

Um die Stromversorgung direkt aus der 200 m entfernten Trafostation Pfaffenwaldring 4 (Baubereich der MPA Universität Stuttgart und IWB) versorgen zu können, bedurfte es eines neuen Trafos sowie einer Neuverlegung der Kabel. Die Kabelverlegung erforderte neu zu montierende Kabeltrassen. Für die ersten hundert Meter konnte aber ein bestehender Kabelgraben genutzt werden. Das EDV-Netz der Technikumshalle wurde mittels LWL-Kabel an das vorhandene EDV-Netz angeschlossen.

Die Vorbereitung der Vergabe und auch die Planung der Elektroinstallationen erforderte von Beginn an eine enge Abstimmung zwischen den Forschungspartnern Liebherr und IWB wie auch die Einbindung der zuständigen Bauverwaltung (Vermögen- und Bau Baden-Württemberg), des Dezernats Bau der Universität Stuttgart nebst den beteiligten Fachplanern und Genehmigungsbehörden (Umweltamt der Landeshauptstadt Stuttgart). Die Elektroinstallationen konnten im ersten Quartal 2019 weitestgehend abgeschlossen werden, obgleich in Anbetracht des Projektverlaufs des Verbundvorhabens im Zuge des Austauschs des Antriebsstrangs der Liebherr-Mischanlage immer wieder Anpassungen in den Schaltschränken und der Verlegung und Zuführung der Stromversorgungskabel durch die ausführende Unternehmung Siemens vorgenommen werden mussten.

Zwar wurde seitens der Elektroinstallation eine erste Inbetriebnahme der Betonmischanlage zu dem im Februar 2019 in Stuttgart veranstalteten "3. Forschungskolloquium Betonstraßenbau" ermöglicht, um anlässlich der Praxisvorführungen erste Betonmischungen herzustellen, doch musste infolge der noch nicht vollständig betriebsbereiten und infolge des noch nicht vom Umweltamt der Stadt Stuttgart freigegebenen Betriebs der Abwasserreinigungsanlage der Betrieb der Mischanlage wieder eingestellt werden.

Auch wenn die Abwasserreinigungsanlage noch nicht freigegeben wurde, so wurde eine erste Inbetriebnahme und Einweisung durch die Fa. Liebherr im Herbst 2019 vorgenommen. Die erheblichen Einschränkungen der nach dem Jahreswechsel 2019/20 im 2. Quartal 2020 vorherrschenden Pandemie führten zu weiteren ungeplanten Verzögerungen, um die Abwasserreinigungsanlage durch Ecofrog in Betrieb nehmen zu können (vgl.

Abbildung 5-7). Erst im Oktober/November 2020 war es dann endlich so weit, dass die Abwasseranlage vollumfänglich funktionsfähig in Betrieb genommen werden durfte. Von da an konnte das Versuchsprogramm starten.

15.2.2.2 Installation der Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage im IWB-Technikum

Mit der Bewilligung des Verbundvorhabens "Betonfahrbahn 4.0" wurde in der ersten Projektphase mit den Partnern Liebherr und Cavex umfassende Abstimmungsgespräche geführt, um für die im Technikum des IWB zu installierende Mischanlage alle projekt-, bau- und anlagenspezifischen Besonderheiten zusammenzuführen und eine für die erfolgreiche Umsetzung der Forschungsziele geeignete Anlagenkonfiguration zu schaffen. Letztlich wurde seitens der Fa. Liebherr folgende Anlagenkonfiguration im Juli 2017 angeboten, die nach der Beauftragung durch die Universität im November 2017 werkseitig gefertigt und im Oktober 2018 an die Universität Stuttgart ausgeliefert wurde.

Folgende Leistungsmerkmale kennzeichnen die für das Vorhaben "Betonfahrbahn 4.0" beschaffte Betonmischanlage **Kombimix 1,25 A-R/DW**, 400 V / 50 Hz:

Mischer: Doppelweilenmischer – DW 1.	•	Mischer:	Doppelwellenmischer – DW 1.2
--------------------------------------	---	----------	------------------------------

- Antriebsstrang: 45 kW, 2 Planetengetriebe
- Mischereinbauteile
- Mischerabluftfilter
- Betonabgabe: Auslauftrichter mit Gummirüssel
 Mischerbühne: Stützkonstruktion nebst Aufstiegsleiter sowie Aufstieg zur Waagenbühne
- Beschickung: Beschickeraufzug
- Wägeeinrichtungen: Zementwaage, Dosiermittelwaagen, Wasserwaage für Rein- und
- RestwasserDruckluftsystem
- Elektrische Verteilerschränke
- Zementsilo, -schnecken: 30 t (24 m³)
- Reihensilo und Wiegeband: 4 Taschen a 17,5 m³ insgesamt 70 m³, 8 Einfachverschlüsse, Rüttler, Feuchtesonde für Kornfeuchtebestimmung, Höchstlast 3.500 kg

Die Doppelwellenmischanlage wurde im Oktober 2018 im Technikum der Universität Stuttgart installiert, nachdem die baulichen Umbaumaßnahmen und auch die elektrischen Installationen soweit abgeschlossen waren, dass die Aufstellung der Mischanlage möglich war.

Einen Eindruck über die Abläufe bei der Installation der Mischanlage geben die nachfolgenden Fotoaufnahmen in Abbildung 15-4.

Um bereits eine eingehende Analyse der Mischprozesse bei der Herstellung von Fahrbahnbetonen mit dem üblichen Mischregime wie auch mit dem in der Standardausführung der Doppelwellen-Mischanlage zur Ausführung kommenden Antriebsstrang mit einer Antriebsleistung von 45 kW vornehmen zu können, wurde mit der Fa. Liebherr vereinbart, den Antriebsmotor durch einen Motor auszutauschen, der zwar die gleiche Leistungsstärke aufweist, der aber die Möglichkeit einer aktiven Kühlung und den Anschluss eines TAM-Sensors ermöglicht. Der Umbau erfolgte im Frühjahr 2020. Damit sollte der Mischer auch in der Standardausführung für die bevorstehenden Versuche in die Lage versetzt werden, eine elektronische Leistungseintragsvermessung sowie eine Analyse der Drehbewegung der Mischwellen mittels der im elektrischen Schaltschrank von Siemens verbauten Frequenzumrichtereinheiten der Fa. ABB vornehmen z*+u können, obgleich die Frequenzumrichter erst zu einem späteren Zeitpunkt, nämlich nach dem in der zweiten Phase, dem geplanten Austausch des Antriebsstranges mit CAVEX-Schwerlastgetriebesatz und deutlich leistungsstärkerem Synchronmotor mit 75 kW sowie den neuen CAVEX-Getriebesätzen, zum Einsatz kommen sollte.



Abbildung 15-4: Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB

Mit dem zuvor beschriebenen Austausch des 45 kW Antriebsmotors sowie mit der Ansteuerung des Antriebsmotors über den Frequenzumrichter war es zunächst möglich, bereits während des Mischbetriebs die in den Frischbeton eingetragene Mischenergie und die sich im Laufe des Mischprozesses einstellenden Mischwerkzeugbewegungen (Drehgeschwindigkeit der Mischerwelle sowie erforderliches Motornennmoment für die Realisierung und Konstanthaltung der Drehgeschwindigkeit) messtechnisch exakt zu erfassen. Zudem wurde seitens der Fa. Liebherr das ursprüngliche Steuerungssystem der Standard Liebherr Mischanlage durch eine modernere höherwertige und leistungsfähigere Steuerung ersetzt und die erforderlichen Ankopplungen der Motorleistungsanschlüsse an die Frequenzumrichter von ABB vorgenommen. Mit diesem Umbau und der Implementierung der neuen Steuerung konnten nunmehr die Versuchsreihen zum Einfluss des Mischenergieeintrags auf die Frischbetonkonsistenz angegangen werden. Die Inbetriebnahme der angepassten Mischanlage erfolgte im September 2020. Die Mitarbeiter des IWB wurden über drei Tage hinweg in die Handhabe, den Betrieb und die Pflege und Wartung der Mischanlage eingewiesen. Herzu stellte Liebherr einen erfahrenen Mischmeister und Mechaniker bereit. Ergänzend erklärte sich auch die Fa. Schnorpfeil bereit, für den Zeitraum der Einweisung einen äußerst erfahrenen Mischmeister sowie einen Betontechnologen für die 3-tägige Einweisung und Erprobung nach Stuttgart zu entsenden, um "learning by doing" unter Anleitung von erfahrenen Profis nicht nur den Mischbetrieb und die Reinigung wie auch die erforderlichen Wartungen kennenzulernen, sondern auch die Durchführung betontechnologischer Frischbetonprüfungen in Verbindung mit den vielfältigen Informationen, die sich der Echtzeitsteuerung aber auch den audiovisuellen Wahrnehmungen ableiten lassen.

Anlässlich der dreitägigen Einführung konnte mit dem technischen Service der Liebherr Mischtechnik in Bad Schussenried einige noch vorhandene Probleme angegangen und gelöst werden. Zudem mussten einige Ventile und Pumpen infolge der einjährigen Dauer des anlagenstillstands seit 2019 wieder der Funktionsfähigkeit zugeführt werden. Einzelne Ersatzteile mussten nochmals nachbestellt werden, so dass zum Oktober 2020 mit der Freigabe des Betriebs der Abwasserreinigungsanlage die Mischversuche zur Charakterisierung des Mischverhaltens der Fahrbahnbetone in der Standardausführung endlich möglich wurden.

15.2.2.3 Umbau des Antriebsstrangs der Technikums-Mischanlage

Nach Durchführung der ersten Mischversuchsreihen mit der standardmäßigen Liebherr Doppelwellen-mischanlage und der Datenerfassung nebst Auswertung wurde in KW 16 der Antriebsstrang des DW1.25 ausgetauscht, um die im Fokus des Verbundvorhabens stehende Optimierung der Herstellung der Fahr-bahnbetone mittels einer rheologiegestützten Mischprozessführung angehen zu können. Schließlich verfügt die Liebherr-Doppelwellen-Mischanlage in ihrer Standardausführung über einen effizienten Antriebsstrang mit einem Liebherr-Planetengetriebe. Zwar begünstigt der gute Wirkungsgrad des Liebherr-Planetengetriebe einen optimalen Energieeintrag in das Mischgut, so dass sehr gute Mischergebnisse in kurzer Zeit erreicht werden. Allerdings weist der Standardantriebsstrang verfügt über einen Asynchron-motor als Antrieb und das Liebherr-Planetengetriebe. Die Kraft zwischen den parallelen Achsen des Mo-tors und des Getriebes wird mit einem Riemen übertragen. Auf den Achsen des Motors und des Getriebes befinden sich Riemenscheiben, über die der Riemen läuft. Abhängig der Durchmesser der Achsen, wird die Geschwindigkeit geregelt, mit denen sich die beiden Scheiben bewegen. Vorteil des Riemen-triebes ist, dass nur geringe Wartungskosten anfallen, dieser ehedem kostengünstig ist, dieser leicht gewechselt werden kann und über eine lange Lebenszeit verfügt. Nachteil des Riemenantriebs ist die Möglichkeit des Rutschens. Infolge des möglichen Rutschens, der Schlupf, lässt sich die im Verbundvor-haben angestrebte rheologiegestützte Mischprozessführung nur bedingt realisieren, da infolge von Schlupf kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Drehbewegung der Motorwelle und der Getriebewel-le besteht.

Entsprechend wurde vom Vorhabenpartner CAVEX ein neuartiges Schnecken-Planeten-Getriebe, das fest über eine Welle und somit schlupffrei die Kopplung von Motor und Getriebe ermöglicht. Damit kann über einen Frequenzumrichter der Motor gezielt so angesteuert werden, dass sich dessen Motorwelle mit einer beliebigen Drehgeschwindigkeit bewegt. Durch die feste Anbindung erfolgt die Drehbewegung unmittelbar auch am Getriebe, dessen Übersetzung dann die Geschwindigkeit der Mischwelle vorgibt.

Um nicht nur drehzahlgeführte Mischregime realisieren zu können, wie dieses über eine FU-Regelung mit allen Asynchron-Motoren möglich ist, sollte im Verbundvorhaben ein Synchronmotor zum Einsatz kommen. Hier

wird ein konstant magnetisierter Läufer (Rotor) synchron von einem bewegten magnetischen Drehfeld im Stator mitgenommen. Der laufende Synchronmotor hat eine zur Wechselspannung synchrone Bewegung. Die Drehzahl ist also über die Polpaarzahl mit der Frequenz der Wechselspannung verknüpft. Mittels eines Frequenzumrichters lassen sich drehzahlvariable Antriebe mit großer Leistung realisieren. Vorteilhaft gegenüber Asynchronmotoren ist die starre Kopplung der Drehzahl und der Winkellage an die Betriebsfrequenz. Daher eignet sich der Synchronmotor für Anwendungen, die belastungsunabhängige, stabile Drehzahlen erfordern. Zudem sind permanentangeregte Synchronmotoren kompakter und effizienter als Asynchronmotoren.

Für die rheologiegestützte Mischprozessführung von Bedeutung ist die Möglichkeit der Drehmomenter-zeugung in Synchronmaschinen. So setzt sich das Drehmoment aus dem Reluktanzmoment und dem synchronen Moment zusammen. Hierzu wird die Drehzahl des Antriebs so lange gesteigert, bis gerade die Drehmomentvorgabe überschritten wird. Dann reduziert der Frequenzumrichter die Drehzahl und prüft stetig, ob das Solldrehmoment gehalten wird. Durch einen rasche Datenabtastrate von FU und Synchronmotor kann mittels Direct Torque Control (DTC) so der magnetische Fluss und das Drehmoment direkt und unabhängig voneinander in einem engen Toleranzband gehalten werden. Damit verbleibt die Drehmoment-Vorgabe stets innerhalb kleinster Schwankungsbreiten, wie dies für eine dreh-momentgeführte Mischprozesssteuerung erforderlich ist.

Ziel der rheologiegestützten Mischprozessführung ist es, für die feinstoffreichen und wasserarmen Betongemische der Fahrbahnbetone den im Vergleich zu normalen Rüttelbetonen höheren Energieeintrag beim Mischen nicht durch längere Mischzeiten realisieren zu müssen. Vielmehr sollen mit dem neuartigen leistungsfähigen Antriebsstrang durch die effiziente Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit ein vollständiger Aufschluss aller Fein(st)stoffe erreicht werden, um so eine bestmögliche Homogenisierung mit einem höheren Energieeintrag zu realisieren.



Abbildung 15-5: Aufbau der Liebherr-Mischanlage am IWB

Es wird davon ausgegangen, dass mit einer bedarfsgerechten Anpassung von Werkzeuggeschwindigkeit und Motornennmoment der Aufschluss und die Homogenisierung des Gemisches beschleunigt und die Mischdauer

minimiert werden kann. Nicht zuletzt soll das Antriebstrangkonzept auch zur qualitätssichernden Bewertung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons im Mischer genutzt werden. Diese Zusammenhänge konnten am IWB mit Labormischsystemen belegt werden. Eine Übertragung auf realmaßstäbliche Mischanlagen ist erstmals mit dem Einsatz des CAVEX-Planentengetriebes und des Einsatzes eines Leistungsstarken und FUgeregelten Synchronmotors möglich. Ein Antriebsstrang, wie er in der DW1,25 des IWB-Mischtechnikums verbaut wurde.

Der Umbau des Antriebsstrangs erfolgte im Februar/März 2021. Das Foto in Abbildung 15-5 erlaubt einen Blick auf die umgebaute Mischanlage. Deutlich tritt das mächtige Bauvolumen des 75 kW-Synchronmotors in den Vordergrund. Dieser ist direkt an das neue CAVEX-Schnecken-Planeten-Getriebe angebunden, das über eine Welle direkt mit dem CAVEX-Getriebeblock der zweiten Mischwelle gekoppelt ist. Der Umbau des Antriebsstrangs der Mischanlage wurde in enger Abstimmung mit den Firmen Liebherr und CAVEX vorbereitet. Beide Unternehmen beteiligten sich auch bei der Installation und der Inbetriebnahme. Den Anschluss des Motors mit der FU-Regelung haben die Firmen Liebherr und ABB unterstützt und sorgten für eine reibungslose Inbetriebnahme vor Ort.







Abbildung 15-6: links oben: neuer Motor rechts: Beide CAVEX-Getriebe im eingebauten Zustand links unten: CAVEX-Getriebe während des Einbaus am Kran hängend

Allerdings musste nach dem Umbau des Antriebsstrangs festgestellt werden, dass der TAM-Sensor nicht mehr funktionierte. Da dieser für die rheologiegestützte Mischprozessführung von wesentlicher Bedeutung ist, musste eine Ersatzbeschaffung ausgelöst werden. Infolge weltweiter Lieferprobleme an elektronischen Bauteilen etc. dauerte die Auslieferung mehr als vier Wochen. Doch zeigte der Einbau des neuen Sensors, dass dieser gleichermaßen wie der zuvor verbaute Senso softwareseitig nicht angesprochen werden konnte. Da die Einbindung des TAM-Sensors durch die Fa. ABB erfolgte, wurde diese beauftragt, die Fehlerursache herauszufinden und das Problem zu beheben. Nach mehreren Anreisen und Überprüfungen wurde dann mit großer zeitlicher Verzögerung der Fehler erkannt und auf vergleichsweise einfache Weise behoben. Die Mischanlage ist seit Mai 2021 nunmehr für die Durchführung der anstehenden Versuchsreihen und die Entwicklung und Erprobung eigener Mess- und Regelungsalgorithmen nutzbar.

Die Abbildung 15-6 gibt einen Einblick über die Arbeiten, welche zur Umrüstung der Mischanlage durch-geführt wurden. Das obere Bild zeigt den neuen 75 kW Synchronmotor. Im Bild links unten ist das neue Schnecken-Planeten-Getriebe der Firma CAVEX zu sehen, das im Vergleich zum standardmäßig verbauten Liebherr-Planetengetriebe ein schlupffreies Umsetzen der Kraft ermöglicht. Mit dem Wegfallen des "Schlupfes", wie dieser im Keilriemenantrieb zwangsläufig möglich ist.

Durch den größeren Motor musste ebenfalls das Gerüst der Anlage selbst umgeplant werden, um weiterhin alle Ebenen der Anlage erreichen zu können. Entsprechend wurde ein neuer Aufgang zur 2. Ebene beauftragt.

Ebenfalls wurden bei dem Umbau ein neuer Notauslass installiert und einige Ungenauigkeiten der Schließklappe behoben.





Abbildung 15-7: Abwasseranalage

Abbildung 15-8: Kapazitive Feuchtesonde

Bei der Sensorik wird insbesondere der Fokus auf den Vergleich der Messgüte verschiedener Feuchtemesstechniken gelegt, da sich sowohl aus den Baustellenanalysen als auch nach ersten Testmischungen am IWB gezeigt hat, dass das in seiner derzeitigen Form verwendete kapazitive Erfassungssystem unzureichend ist (vgl. Abbildung 15-6).

Hierzu wird die Technikumsmischanlage um einen Versuchsstand erweitert, mit dem die bei der Betonherstellung (z.B. in Transportbetonwerken) unterschiedlichen eingesetzten Feuchtmessprinzipien auf deren Messgenauigkeit im direkten Vergleich geprüft werden. Im Planungsprozess ist dabei berücksichtigt worden, dass der Versuchsstand in seiner Parametrierbarkeit die nötigen Freiheitsgrade (u.a. Prallhöhe und -winkel) zur Eruierung der optimalen geometrischen Ausrichtung der Feuchtesonde in Abhängigkeit der zu prüfenden Gesteinsfraktion gewährleistet. Neben der Messgüte soll auch die Handhabung der Kalibrierung respektive die Kalibrierfähigkeit der einzelnen Feuchtemesstechniken bewertet werden. Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 15-7 die Fertigungszeichnung des Versuchsstands dargestellt.



Abbildung 15-9: Konstruktionsskizze des Versuchsstands am IWB zur Prüfung der Messgüte verschiedener Feuchtemessprinzipien

15.2.3 Prüfstand zur Entwicklung von Methoden zur Ebenheitsprüfung

An der RWTH Aachen entstand ein Prüfstand, mit dessen Hilfe eine Methode zur Ebenheitsbestimmung des Betons während des Einbaus entwickelt werden soll. Der Prüfstand besteht aus einer verfahrbaren Schlittenkonstruktion, mit dessen Hilfe Bewegungen nachgestellt werden können, die in der Realität vom Gleitschalungsfertiger vollzogen werden. Der Schlitten dient ebenfalls als Messtechnikträger.

In Abbildung 15-8 ist der Gesamtaufbau der Schlittenkonstruktion gezeigt. Es handelt sich um ein variables Traversenkonzept, dass trotz seiner Flexibilität besonders steif ausgelegt ist. Im Mittelpunkt der Sensorik steht ein 2D-Linienlaser, mit dem das Oberflächenprofil rekonstruiert werden soll. Dieser Laser (vgl. Abbildung 15-9) ist unter der schwarzen Abschattung an einem Schwenkmotor montiert, mit dem sich der gesamte Sensor um seine Querachse um +/- 30 Grad schwenken lassen kann. Des Weiteren lässt sich die Sensoreinheit mit einer Handkurbel in der Höhe verstellen.

Neben dem Linienlaser gibt es Messtechnik zum Aufzeichnen des Vorschubs, von Beschleunigungen sowie der Sonneneinstrahlung.



Abbildung 15-10: Gesamtaufbau des Prüfstandschlittens


Abbildung 15-11: Linienlaser innerhalb der Abschattung

Zwischen den Bordsteinen lässt sich eine Betonfahrbahn mit Hilfe eines Gleitschalungsfertigers einbauen. Es lassen sich Einbauten mit einer Länge bis zu 20 Metern und einer Breite von einem Meter realisieren.

Im Rahmen des Projektes wurden am Technikum fünf Einbauten vorgenommen. Während bei den ersten beiden Versuchen die Vermessungen erst nach den Einbauten vom Schlitten aus stattfanden, wurde die Oberflächen bei den letzten drei Versuchen bereits vom Linienscanner am Fertiger während des Einbaus vermessen. Dabei konnte auch die entwickelte Applikation getestet werden, die alle Kennwerte an den digitalen Leitstand zur Universität Stuttgart schickt. Nach dem prozessintegrierten Vermessen wurden weitere Messungen vom Schlitten aus aufgezeichnet, um die Ebenheitserkennung weiter validieren zu können. Es wurden an 25 Tage fast 500 Messreihen mit variierenden Vorschüben, Neigungen und Höheneinstellungen aufgezeichnet.

Des Weiteren wurde der Schlitten nach dem dritten Einbau so umgebaut, dass die Messsensorik der Firma Lehmann + Partner für die Validierung integriert werden konnte. Hierfür war es notwendig, die Konstruktion so abzuändern, dass durch zwei Quertraversen sämtliche Messtechnik aufgenommen werden konnte. Da der Laserscanner der Firma Lehmann + Partner schräg nach hinten misst, wurde die hintere Quertraverse von Lehmann + Partner genutzt, die vordere Quertraverse dient der Aufnahme der Messtechnik von Wirtgen. Anhang

Abbildung 15-10 zeigt den Prüfstand nach dem Umbau:



Abbildung 15-12: Weiterentwicklung des Prüfstandes



15.2.4 Mobile Messsysteme zur Erfassung von Ebenheitsparameter - Laserscanning Systeme S.T.I.E.R und I.R.I.S

Zur Erfassung der Ebenheitsparameter beim Betonstraßenbau wurden seitens L+P zwei kinematische Erfassungssysteme eingesetzt: das Fahrzeug S.T.I.E.R 2 und das Fahrzeug I.R.I.S. 13. Nachfolgend werden die Modellnummern zum Zwecke einer besseren Lesbarkeit weggelassen. Die Messfahrzeuge S.T.I.E.R und I.R.I.S unterscheiden sich nicht in Bezug auf ihren Aufbau und Kernkomponenten, wie das Positionierungssystem. Während S.T.I.E.R hinsichtlich der verbauten Sensoren für die speziellen Erfordernisse der netzweiten Zustandserfassung und -bewertung von Straßen sowie Abnahme- und Gewährleistungsverfahren konfiguriert wurde, ist I.R.I.S für hochgenaue dreidimensionale Mobile Mapping Anwendungen mit zwei Laserscannermodellen konzipiert. Beide Systeme werden nachfolgend im Detail beschrieben.

Das kinematische Multisensorsystem S.T.I.E.R, ist ein von L+P entwickeltes und betriebenes Messsystem zur Erfassung der Längs- und Querebenheit, der Textur, der dreidimensionalen Oberfläche sowie des Oberflächenbilds von Straßen und Verkehrsflächen. Die Kernkomponenten von S.T.I.E.R sind ein inertiales Positionierungssystem, Laserdistanzsensoren zur Messung eines Höhenlängsprofils in der rechten Rollspur (HRM), ein Oberflächen-LiDAR-System sowie verschiedene Kamerasysteme zur Erfassung der Fahrzeugumgebung und der Fahrbahnoberfläche (siehe Abbildung 3-10). Seit dem Jahr 2012 hat das Messsystem der ersten und zweiten Baureihe kontinuierlich eine zeitbefristete Betriebszulassung der BASt und wird seit Jahren zuverlässig im Rahmen der ZEB-Messkampagnen auf Bundes- und Länderebene eingesetzt. Auch das neueste S.T.I.E.R Modell der aktuell dritten Generation wurde 2020 für den ZEB-Einsatz zugelassen. Die für das Verbundprojekt relevanten Datenquellen sind zum einen das inertiale Positionierungssystem und zum anderen der Oberflächenlaserscanner.



Abbildung 15-13: Mobile Laserscanning System S.T.I.E.R 3 der Firma L+P. Zwischen dem rechten Vorder- und Hinterrad befinden sich 4 nach dem HRM-Prinzip angeordnete Einzellaser zur Erfassung eines Höhenlängsprofils in der rechten Rollspur. Am Heck sind ein Oberflächenlaserscanner sowie eine hochauflösende Oberflächenzeilenkamera samt zugehöriger Beleuchtungseinheit montiert.

Zu den relevanten Kernkomponenten zählt das Positionierungssystem vom Typ Applanix POS LV 420. Dabei handelt es sich um ein integriertes System aus globalem Navigationssatellitensystem (GNSS), inertialer Messeinheit (IMU) und einem Wegstreckenmesser. Durch die Kombination dieser Bestandteile ist sowohl die Bestimmung der absoluten Position als auch der relativen Positionsänderung inklusive aller Raumwinkel und Beschleunigungen möglich. Das GNSS dient dabei der Positionierung des Systems im globalen Raumbezug. Die IMU nutzt zur Bestimmung der Winkeländerungen und der relativen Orientierung einen faseroptischen Kreisel mit drei Beschleunigungssensoren für jede Bewegungsrichtung. Mit einer Frequenz von 200 Hz werden die Beschleunigungen und Winkeländerungen für alle drei Raumachsen aufgezeichnet. Die eingesetzte IMU besitzt einen Winkelfehler von weniger als 0.03 Grad bei einminütigen GNSS Ausfall, sodass auch bei schlechten GNSS-Bedingungen eine Positionsbestimmung mit einer geringen sensorspezifischen Drift fortgeführt werden kann. Zusätzlich ist zur Erfassung des zurückgelegten Weges ein Wegstreckenmesser an einem Rad montiert. Je Radumdrehung werden etwa 2000 Pulse aufgezeichnet. Die Auflösung beträgt somit, je nach Radumfang, circa 0.5 mm je Puls. Aus den Rohdaten aller im Fahrzeug verbauten Sensoren wird während der Messung mit Hilfe eines Kalman-Filters eine Realtime-Trajektorie berechnet, welche die Position und alle Raumwinkel auf Basis der Rohdaten enthält. Die Ermittlung der finalen Positionen und Winkel erfolgt mit Hilfe der proprietären Software POSPac MMS unter Nutzung externer Korrekturdaten [Landau et al. 2002]. Im Ergebnis der Berechnung liegt die Fahrzeugtrajektorie als Punktfolge mit allen relevanten Informationen, wie beispielsweise Zeitstempel, Beschleunigungen, Raumwinkel und Koordinaten vor. Die absolute Genauigkeit der Trajektorie nach Post-Processing der Daten des inertialen Positionierungssystems ist bei GNSS-Abdeckung mit 20mm für die Lage- und 50mm für die Höhenkomponente spezifiziert [Applanix 2019].

Bei dem auf die Fahrbahnoberfläche ausgerichteten Laserscanner handelt es sich um einen Pavement Profile Scanner Plus (PPS) des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik [Reiterer et al. 2013]. Der PPS erreicht eine Messfrequenz von 1 MHz und erfasst circa 800 Profile je Sekunde. Die Messgenauigkeit des PPS liegt, gemittelt über ein 10 cm × 10 cm großes Oberflächenelement, im Submillimeterbereich. Um diese extrem hohe Präzision bei großen Messgeschwindigkeiten und gleichzeitiger Augensicherheit zu gewährleisten, nutzt der PPS als Messprinzip das Phasenvergleichsverfahren und eine Wellenlänge im nahen Infrarotbereich. Weitere technische Spezifikationen sind bei [FhG 2019] zu finden.

Über die zeitliche Synchronisierung der Messungen des Positionierungssystems und des Laserscanners entsteht das grundlegende Datenprodukt für die weiterführenden Analysen in Form von dichten 3D-Punktwolken. Auf einer Erfassungsbreite von ca. 4.2 m nimmt der PPS quer zur Fahrtrichtung etwa alle 4mm eine Oberflächenmessung vor. Bei einer Befahrungsgeschwindigkeit von 80 km/h werden alle 28mm derartige Scanprofile erzeugt. Eine 4m*5m große Betonplatte wird demnach mit ungefähr 0.2 Millionen Messpunkten flächenhaft abgetastet. Eine höhere Messpunktdichte in Fahrtrichtung kann durch Reduktion der Befahrungsgeschwindigkeit erreicht werden. Aus den beschriebenen, unorganisierten 3D-Punktwolken wird im Zuge der Datenprozessierung ein regelmäßiges, an der Trajektorie ausgerichtetes Messpunktgitter erzeugt (3D-Oberflächenmodell), wie es auch im Automotive-Bereich für Simulationszwecke Einsatz findet [Rauh et al. 2008]. Für Ebenheitsanalysen im Kontext der Zustandserfassung und -bewertung von Straßen ist eine Rasterweite von 0.1m in Längs- und Querrichtung maßgeblich [FGSV 2009]. Aufgrund der geordneten Matrixstruktur des 3D-Oberflächenmodells können Längs- und Querprofile mit absoluten Höhenwerten effizient an beliebigen Stellen extrahiert und einer Ebenheitsanalyse zugeführt werden.



Abbildung 15-14: Mobile Laserscanning System I.R.I.S der Firma L+P. Im Projektkontext sind vor allem der hinten am Dachträger mittig montierte Oberflächenscanner PPS sowie der rechts daneben montierte 350° Laserscanner CPS von Bedeutung.

Das zweite im Verbundvorhaben verwendete Mobile Mapping System ist I.R.I.S, welches im Allgemeinen zur bildhaften und dreidimensionalen Erfassung des Straßenraumes eingesetzt wird. Das Messfahrzeug ist so konzipiert und dimensioniert, dass eine Befahrung sowohl des Fernstraßennetzes als auch des kommunalen Straßennetzes im fließenden Verkehr möglich ist. Die auf dem Fahrzeugdach montierte Rahmenkonstruktion trägt die Sensorik, welche mehrere Umfeldkameras, zwei Laserscanner und ein inertiales Positionierungssystem vom Typ Applanix POS LV 420 umfasst (siehe Abbildung 3-11).

Neben dem oben beschriebenen Pavement Profile Scanner Plus verfügt das I.R.I.S System noch über ein zweites hochpräzises LiDAR Instrument. Dabei handelt es sich um den ebenfalls vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik hergestellten Clearance Profile Scanner (CPS). Der CPS ist ein Rotationslaserscanner zur Erfassung von Lichtraumprofilen, der nach dem Phasenvergleichsverfahren misst. Durch die Rotation eines Spiegels erfasst der Laserscanner ein 2D Profil in einem Aufnahmebereich von 350°. Der CPS befindet sich im Heckbereich und ist so ausgerichtet, dass die einzelnen Profile quer zur Fahrtrichtung aufgenommen werden. Durch die Bewegung des Messfahrzeugs beschreibt der Laserstrahl eine Helix, wodurch der Straßenraum entlang der Trajektorie in einem etwa 30m breiten Korridor sukzessive abgetastet wird. Der CPS erreicht eine Datenrate von 2 MHz und erfasst circa 200 Profile je Sekunde. Die Genauigkeit der Längenmessung beträgt je nach Reflexionseigenschaft einer Oberfläche in 5 m Entfernung 3 bis 7 mm. Diese und weitere technischen Spezifikationen des Scanners sind bei [FhG 2019] aufgeführt.

15.3 Applikationsplattform als zentrales Prozessleitsystem für die Erfassung und Bewertung der Beton-Fahrbahnherstellung

Zentraler Bestandteil der Datenerfassung und Aufbereitung ist die Applikationsplattform des Prozessleitsystems. In dieser werden alle Daten der Projektpartner erfasst, in einer Datenbank abgespeichert und zur weiteren Verwendung sowie Anzeige aufbereitet. Zudem können im weiteren Verlauf parallel dazu Simulationen und Prädiktionen zum Prozess- und Betonverhalten durchgeführt werden.

15.3.1 Architektur

Die grundlegende Architektur für den Datenaustausch des zentralen Prozessleitsystems ist in Abbildung 2.35 skizziert. Sämtliche Prozessschritte sollen Daten über ein zentrales Baustellen-VPN, welches von einem Server am ISYS verwaltet wird, an die Applikationsplattform übertragen. Dabei gibt es je nach Prozessteilnehmer unterschiedliche Kommunikationspfade, welche durch die unterschiedliche Hardware und Lösungsansätze der Projektpartner bedingt sind. Die Applikationsplattform stellt dabei verschiedene Services zur Verfügung wie eine Datenbank, Schnittstellen zu den APIs der Projektpartner, um Maschinendaten direkt zu empfangen und in die Datenbank zu übertragen, Onlineformulare zur manuellen Eintragung von Daten in die Datenbank sowie VPN-Services zur sicheren Kommunikation.



Abbildung 15-15: Prinzipskizze der Architektur und des Datenaustauschs für ein zentrales Prozessleitsystem.

Die Applikationsplattform wurde dazu auf einem Desktop Computer aus dem Bestand des ISYS implementiert, welcher eine Standardausstattung mit einem Intel i5 Prozessor, 8 GB RAM und einer 500 GB Festplatte besitzt. Ein solcher Computer ist für die experimentelle Erprobung mit gegebenen Anforderungen ausreichend. Durch den raschen Wandel der Anforderungen an die Applikationsplattform und deren stetige Erweiterung ist es notwendig, eine Virtualisierungsebene einzuführen. Somit kann durch die Modularität die notwendige Flexibilität gewährleistet werden. Hierzu wurde mit dem Betriebssystem Proxmox Virtual Environment eine entsprechender Hypervisor aufgesetzt. Auf diesem Hypervisor wurde die Infrastruktur realisiert wie in Abbildung 5-16 dargestellt. Auf diesem System laufen somit alle Verbindungen zusammen.



Abbildung 15-16: Prinzipieller Aufbau der Hardwarearchitektur des zentralen Leitstands

Die Datenbank, der zentrale Bestandteil der Plattform, kann dabei entweder manuell mit Daten gespeist werde oder über die Schnittstellen zu den Projektpartnern. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur und verwendeten Lösungen der jeweiligen Projektpartner, muss die Plattform verschiedene Frameworks und Schnittstellen unterstützen. Z.B. werden die Daten des Fertigers über ein Spring-Framework und eine direkte VPN Verbindung übertragen und die Daten der Mischanlage über eine OpenVPN Verbindung. Für Details zur Implementierung sei auf AP C3.3 in Kapitel 7.3.3 verwiesen.

15.3.2 Datenzusammenführung und Anzeige am Beispiel Köln-Wahn I

In einem ersten Schritt kann die Applikationsplattform dazu genutzt werden, die Daten, die für KW I noch dezentral an jeder Maschine aufgezeichnet wurden, manuell zusammenzuführen. Dazu haben die Projektpartner die Datenschriebe ihrer Maschinen dem ISYS nach Abschluss der Baustelle offline zur Verfügung gestellt. Diese wurden manuell in die Datenbank eingefügt. Die Datenbank wurde dann genutzt um Auswertungen und Analysen der Daten wie in AP A1 beschrieben durchzuführen.

Um die Daten zusätzlich allen Projektpartnern zugänglich zu machen, wurde die Applikationsplattform um einen Webserver erweitert. Auf diesem können die Daten der Datenbank grafisch angezeigt werden. Dadurch erleichtert sich das Verständnis der Daten und die Projektpartner können gezielt nach für sie relevanten Daten und Zusammenhängen suchen. Der Datenbankzugriff auf den Server am ISYS ist dabei über ein VPN-gesichertes Netzwerk mittels OpenVPN und eines Webbrowsers möglich.

Abbildung 5-15 zeigt dabei den Aufbau der Website. Dabei sind für KW I auf einer Übersichtsseite die wichtigsten Eckdaten der Baustelle dargestellt. Diese umfassen zum einen Planungsdaten wie Zeitraum und Baustellenteilnehmer aber auch Statistiken der Prozessschritte wie z.B. insgesamt produzierte Chargen der Mischanlage oder die im Durchschnitt eingebaute Wegstrecke des Fertigers pro Tag. Neben den Eckdaten sind zudem die erfassten Parameter und Zeitreihendaten der Projektpartner (Mischanlage, Fertiger, Oberflächenbearbeitung, Betonuntersuchungen) sowie die von Wetterstationen in Deutschland frei verfügbaren Wetterdaten in der Nähe der Baustelle grafisch aufgearbeitet. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.38 für die Mischanlage illustriert. Über ein Auswahlfeld lassen sich hier tageweise die Daten, z.B. der Mischzeit und des Produktionsvolumens, anzeigen. In rot ist dabei der Vorgabewert aufgetragen und in grün die tatsächlichen Werte für Mischer 1 und Mischer 2. Zusätzlich sind rechts daneben die statistischen Häufigkeiten aufgetragen sowie in einer Tabelle der Mittelwert und die Standardabweichung des angezeigten Signals. Für detaillierte Analysen zu den Signalen sei auf AP A1 verwiesen.

Betonfahrbahn 4.0	≡					
MESSKAMPAGNEN	Generelle Informa	ationen der E	Baustelle Flugfeld	Köln-Wahn		
🛃 Flugfeld Köln-Wahn 🗸	Rahmendaten			Aufbau der Ba	austelle	
Generelle Informationen	Ort: FI	lugfeld Köln-Wahn		Art der Fläche:	Flugvorfeld	
Wetterdaten	Zeitraum: 13	3.06.2018 - 16.08.2018	(65 Tage)	Bauweise:	Einschichtiger Einbau mittels	Gleitschalungsfertiger
Mischanlage	Art der Fläche: Fl	lugvorfeld		Dimensionierung:	38cm Schichtdicke	
Fertiger				Ablauf:	1x Laservermessung der HGT	
Oberfläche					1x Mischanlage	
Betonuntersuchungen					5x Sattel	
🕼 A1 Wittlich-Salmtal 2 🗸 🗸	- Tinh	Vorfeld BW Flughafen	(he)		1x Fertiger	
	Luftwaffenkaserne Köln-Wahn	Kölnonn Milite her			1x Traverse für Besenstrich	
		Tel			1x Sägeteam	
	19	nk-			1x Mobiles Betonlabor zur Eig	enüberwachung
				1x Fremdüberwachung		
		Report a n	unblem I @ OpenStreetMap contribu		1x Laservermessung der Ober	fläche
		Report a p				
	Mischanlage			Logistik (am Be	egehungstag)	
	had and and					
		Fertiger	Handfeld	Transportfahrzeug		Sattel
	Тур	Doppelanlage Liel	bherr MobilMix 2.5	Anzahl		5
	Produzierte Chargen	4303	982	Mittlere Transportz	zeit	10 min
	Produziertes Volumen	10812 m ³	2410 m ³	Mittlere Rundenze	it	21 min
	Einbautage	29 d	20 d	Mittlere Befüllzeit		3 min

Abbildung 15-17: Übersichtsseite und Navigationsleiste (links) des Webinterfaces am Beispiel der Baustelle Köln-Wahn I

Neben den Maschinendaten wurden ebenso die manuell erfassten Daten eingetragen, wie z.B. für die Betonuntersuchungen. Im Gegensatz zu den Daten der Maschinen liegen diese Daten in einem gröberen Raster von ca. 1 h vor und sind über den gesamten Baustellenzeitraum dargestellt.



Abbildung 15-18: Detailanzeige und grafische Aufbereitung der aufgezeichneten Daten am Beispiel der Zeitverläufe der Mischzeit und des Produktionsvolumens der Mischanlage an einem Einbautag

15.3.3 Erweiterung um Datenerfassung mittels Onlineformularen in Wittlich II

Dieses Konzept wurde für die Baustelle Wittlich II in einem ersten Schritt um eine manuelle Onlineerfassung von Daten ergänzt. Dazu wurden Formulare in Zusammenarbeit mit OAT und Schnorpfeil für die Nachbearbeitung (Sprühen, Bürsten, Schneiden) und die Frischbetonuntersuchungen und -bewertungen erarbeitet und während des Einsatzes auf der Baustelle angepasst.

Die Liveanzeige der eingegebenen Daten erfolgt über eine Tabellenstruktur wie in Abbildung 15-19 dargestellt. Sobald ein neuer Datensatz erfasst wurde, steht dieser sowie die damit verbundenen Anmerkungen allen Teilnehmern zur Verfügung. In Abbildung 5-20 ist ein solches Onlineformular für den Fall der Schnittprotokolle in Wittlich II nochmals dargestellt. Details dazu sind in AP C3.3 in Kapitel 7.3.3.4 zu finden.

GART	A1 Wittlich- Salmtal II	25.09.2019 11:32	109+680	bewoelkt	16,0	Erneuter Stillstand wegen fehlendem Beton
a	A1 Wittlich- Salmtal II	25.09.2019 11:48	109+680	bewoelkt	16,0	Fortsetzung der Betonage nach 20 Minuten Standzeit keine Abstände zwischen Fertigern und Sprühbühne
S	A1 Wittlich- Salmtal II	14.10.2019 09:00	112 + 350	klar	14,0	Betoneinbau beginn bei 112 + 300 Ansatz (Nachgearbeitet = N G)
S	A1 Wittlich- Salmtal II	14.10.2019 09:57	112 + 400	klar	14,0	
3 87	A1 Wittlich- Salmtal II	14.10.2019 10:58	112 + 450	klar	18,0	
ø	A1 Wittlich- Salmtal II	14.10.2019 11 [.] 59	112 + 5 00	sonnig	25,0	

Abbildung 15-19: Auszug aus den online erfassten Sprühprotokollen

Betonfahrbahn 4.0	≡					
MESSKAMPAGNEN	Eingabemaske Schnittprotoko	lle				
🛃 Flugfeld Köln-Wahn 🗸	Erfassung der Basisdaten					
🕜 A1 Wittlich-Salmtal 2 🗸	Baustelle:	A1 Wittlich-Salmtal II				
Generelle Informationen	Zeitstempel:	25.09.2019 02:19:55				
Beprobung Frischbeton	Station:	109+360				
Bewertung Frischbeton	Fugenart	Querfuge				~
Bürstprotokolle	Witterung:	feucht				~
Schnittprotokolle	Lufttemperatur:	13.0				▲ ▼
	Betontemperatur:	23.0				*
	Luftfeuchtigkeit:					▲ ▼
	Messverfahren Festigkeit:					\sim
	Festigkeit:	11.0	11.0	•	11.0	×
		11.0	10.0		11.0	×
		11.0	11.0	*	11.0	×
	Position:	Position setzen		49.94	6.881	188.0

Abbildung 15-20: Eingabemaske des Onlineformulars am Beispiel der Schnittprotokolle für Wittlich II

15.3.4 Zentrale Echtzeitprozesssteuerung BF4.0 WebApp

Auf Basis der Erkenntnisse der Datenzusammenführung der Messdaten aus Arbeitspaket A und den ersten Erfahrungen mit den online Formularen wurde eine weitere WebApplikation aufgebaut. Diese abstrahiert die Prozesse der untersuchten Baustellen und vereinheitlicht die Baustellendokumentation und den Informationsfluss auf der Baustelle. Neben den manuell zu erfassenden Daten werden auch die Maschinenschnittstellen integriert. Diese Applikation wurde sukzessive weiterentwickelt und um neue Aspekte ergänzt.

Eine schematische Darstellung des Konzeptes zur Baustellenvernetzung und der Integration der verschiedenen Prozessteilnehmer in die WebApplikation ist in Abbildung 15-21 gegeben. Hierbei wurden Echtzeitschnittstellen zu allen Maschinen auf der Baustelle geschaffen, welche einen automatisieren Datenaustausch ermöglichen. Die manuell zu erfassenden Informationen werden über entsprechende Formulare erfasst. Darüber hinaus wird dem Personal über Übersichtsseiten der Ist-Stand auf der Baustelle präsentiert und wichtige Informationen zum Download bereitgestellt.



Abbildung 15-21: Konzept Baustellenvernetzung.

Die Hauptaufgaben der BF4.0 WebApp sind auf der Datenerfassungsseite die Realisierung aller Maschinenschnittstellen (Mischanlage, Materiallogistik, Fertiger, Nachbearbeitungsfuhrpark) und das systematische Einsammeln aller manuell zu erfassenden Daten (Frischbetonbeprobung, Frischbetonbeurteilung, Nachbearbeitungsprotokolle für Sprühen, Bürsten und Schneiden). Auf der Informationsmanagementseite wird dem Nutzer ein Echtzeiteinblick in die Baustelle gewährt, die Informationen aus verschiedenen Quellen zusammengeführt, aufbereitet und angezeigt sowie auf unterschiedliche Weise (Tabellen, Karten, Diagramme) die Datenbestände angezeigt, gefiltert und zum Export angeboten.

Eine detaillierte Aufstellung der Funktionen und Einzelheiten zur Implementierung sind in Abschnitt 7.3.4.3 ausführlich dargestellt.

15.4 MPS3 DASHBOARD

15.4.1 MPS3 DASHBOARD - PRODUKTIONSSTATISTIK



15.4.2 MPS3 DASHBOARD - WAAGESYSTEM



15.4.3 MPS3 DASHBOARD - MATERIALFEUCHTE

LIEBHERR

MPS3 Datenbank

Übersicht

Produktionsstatistik

Werktagebuch Waagesystem

Materialfeuchte

Materialanlieferung

Materialfeuchte



Chargeninformationen

Batchid: 71245 Produktionszeitpunkt: 21.07.2021 14:53 Mixdesign: 2674 Boppard-Waldesch C1 Produktionsvolumen: 2.5m⁸ WZ-Wert: 0.42

Material	Vorgabe [kg]	Korrektur [kg]	Einwaage [kg]	Feuchte [%]
Sand 0/2	1293	95.69	1418.34	7.4
2/8	789.75	0	786.4	o
8/16	1357.75	0	1353.28	0
16/22	1574.5	0	1573.49	0
Frischwasser	375	-103.89	269.81	0
HaBe LP66	6.48	0	6.46	0
CEM III/A 42,5 N	900	0	901.89	0
HaBe VZ85	1.8	0	1.86	0

Die Datentabelle zeigt die unbereinigten Einwaagen. In dem Diagramm wurden alle gleichen Materialien je Charge addiert, um die summarische Waagegenauigkeit zu erhalten.

15.5 ÜBERSICHTSINFORMATIONEN ZU DEN BAUSTELLEN

15.5.1 Dieblich-Boppard BAB A61 (TEIL I) (Station 234+430 bis zur Station 237+250, FR Ludwigshafen)

Baustellenübersicht

Zeitraum	Einbau:	25.09. bis 16.10.2017				
	Begehung:	28.09.2017				
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wirtgen, OAT					
vor Ort (Maschinen, Messungen)	Lehmann+Partner					
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wirtgen, Lehmann+Partner					
(Begehung/Ana- lyse)	Liebherr, ISYS,	IWB, MPA, Cavex				
Fahrbahn	Horizontaler-H	ybrid (Schwarz-Weiß-Bauweise)				
	Standstreifen & LKW Fahrbahn: Unterbau FSV 20cm, Asphalt 10 cm, Beton 26 cm (restliche Streifen Asphalt 36 cm)					
	Unterbeton ca. 20cm, Oberbeton ca. 6 cm					
	Einbau in 7,5 m Breite, 3,9 km Länge					
Maßnahme	Fertigung der Betonoberfläche (UB+OB) Standstreifen & LKW Fahrbahn					
Maschinenpark	Wirtgen Gleitso	chalungsfertiger				
	- 2 hintereinander laufend für UB & OB					
		500				
	- Dübel	und Anker auf Körben, nicht eingerüttelt				
	2 Transportbetonanlagen/werke					
	- Mischa	anlage für Unterbeton (fremd)				
	0	Stationär				
	0	Werk Boppard-Buchholz				
	0	Anlagenparameter:				
		 Hersteller: HIT Anlagenbau 				
		 Baujahr: 2009 				
		 Dosierung Gesteinskörnung: 6 Kammer Reihendoseur 				
		 Chargengröße: 2,25 m³ 				
		 Zementsilos: 6 Silos à 95 t 				
	- station	are Anlage fur Oberbeton (fremd)				
	0	stationar				
	0	2,25m ²				
	0	werk kauentai				

- Anlagenparameter:
 - Hersteller: Liebherr
 - Baujahr: 1997
 - Dosierung Gesteinskörnung: 5 Kammer Reihendoseur
 - Chargengröße: 2,25 m³
 - Zementsilos: 2 Silos à 100 t + 1 Silo mit 2 Kammern à 50 t
- (unterschiedliche Transportentfernung)

Fugen- und Waschbetonherstellung

- Fugenschneider für Quer- und Längsfugen
- Radlader mit Bürstenausbau zum Entfernen des Oberflächenmörtels

Vermessung

_

Messfahrzeug IRIS bzw. STIER

Beton Unterbeton: C 30/37, XC4, XF4, XM2, C1, D_{ma x}= 22mm

Oberbeton: C 30/37, XC4, XF4, F2, D_{max} = 8mm

Impressionen



Abbildung 15-22: Hybridbauweise



Abbildung 15-23: Befahrungsplan der Baustelle für den zweischichtigen Einbau



Abbildung 15-24: Besichtigung Mischanlage



Abbildung 15-25: Dieblich I Einbau



Abbildung 15-26: Dieblich I Nachbehandlung & Fugenschnitt

<u>Analyse</u>

Die Baustelle wurde eingehend analysiert. Unter anderem wurden folgende Schritte betrachtet:

- Analyse der einzelnen Bauabschnitte (auch im Vergleich mit Dieblich II) hinsichtlich
 - Transportkette (Transportprozess (BPO), Abstimmung Transport/Einbau)
 - o Ebenheit auch hinsichtlich Einbauvorgang (Abtastung/Fahrdraht)
 - o Sichtung der Auswirkung der Betoneigenschaften im Einbringprozess
- Baustellenbegehung

Eine detaillierte Analyse der Baustelle ist im Arbeitspaket A zu finden

15.5.2 Dieblich-Boppard BAB A61 (TEIL II) (Station 237+250 bis zur Station 241+250, FR Ludwigshafen)

Baustellenübersicht

Zeitraum	Einbau:	26.09.2018 bis 19.10.2018				
	Begehung:	18.10.2018				
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wirtgen, OAT					
vor Ort (Maschinen, Messungen)	Lehmann+Part	ner				
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wirtgen, Lehmann+Partner					
(Begehung/Ana- lyse)	Liebherr, ISYS, IWB, MPA					
Fahrbahn	Horizontaler-H	ybrid (Schwarz-Weiß-Bauweise)				
	Standstreifen & LKW Fahrbahn Unterbau FSV 20 cm, Asphalt 10 cm, Beton 26 cm (restliche Streifen Asphalt 36 cm)					
	Unterbeton ca. 20 cm, Oberbeton ca. 6 cm					
	7,5 m Breite, 3,6 km Länge					
Maßnahme	Fertigung der Betonoberfläche (UB+OB) Standstreifen & LKW Fahrbahn					
Maschinenpark	Wirtgen Gleitso	chalungsfertiger				
	- 2 hintereinander laufend für UB & OB					
	- UB: SP:	94i 94i mit DBI				
	- Dübel ı	und Anker eingerüttelt				
	2 Transportbetonanlagen/werke					
	- Mischa	nlage für Unterbeton (fremd)				
	0	mobil				
	0	3,3 m³ Bonnard-Buchholz				
	- station	äre Anlage für Oberbeton (fremd)				
	0	stationär				
	0	2,25 m ³				
	o - untersi	Werk Rauental				
	Transport (LKW)					
		r, hrmischer				
	- UB: Sattel					
	Fugen- und Wa	schbetonherstellung				
	- Fugens	chneider für Quer- und Längsfugen				

	 Radlader mit Bürstenausbau zum Entfernen des Oberflächenmörtels Vermessung
	- Messfahrzeug IRIS/STIER
Beton	Unterbeton: C 30/37, XC4, XF4, XM2, C1, D _{max} = 22mm
	Oberbeton: C 30/37, XC4, XF4, F2, D _{max} = 8mm

<u>Analyse</u>

Die Baustelle wurde eingehend analysiert. Unter anderem wurden folgende Schritte betrachtet:

- Analyse der einzelnen Bauabschnitte (im Vergleich mit Dieblich I) hinsichtlich
 - Transportkette (Transportprozess (BPO), Abstimmung Transport/Einbau)
 - o Ebenheit auch hinsichtlich Einbauvorgang (Abtastung/Fahrdraht)
 - o Sichtung der Auswirkung der Betoneigenschaften im Einbringprozess
- Baustellenbegehung

Anł	ang
-----	-----

15.5.3 BAB A1 AK Wittlich - AS Salmtal – km 116,000 bis 111,900 (Wittlich I)

Baustellenübersicht

Zeitraum		Einbau:	27.08.2018 bis 21.09.2018			
		Begehung:	08.09.2018			
Beteiligte	Partner	Schnorpfeil, Wi	rtgen, Liebherr, OAT,			
vor Ort (Maschinen, Messungen)		Lehmann+Partr	ner			
Beteiligte Partner		Schnorpfeil, Wi	rtgen, Liebherr, OAT,			
(Analyse)		Lehmann+Partner, ISYS, IWB				
Fahrbahn		2-lagig, 6 cm Oberbeton, 20 cm Unterbeton, Waschbetonoberfläche				
		Unterlage 10 cm Asphalttragschicht				
Maßnahme		Fertigung der Betonoberfläche (UB+OB) mit Waschbetonoberfläche				
Maschinenpark		2xGleitschalungsfertiger Wirtgen, Einbaubreite: 11,5 m				
		Liebherr Mobilmix 2.5-F – Tandemanlage (2 Stück) mit Litronic MPS III Steuerung sowie LWS 3 Messverstärker, in der Nähe Einbau				
		LKW-Muldenki	oper / -Sattelkipper			
		Fugen- und Wa	schbetonherstellung			
		 Fugenschneider f ür Quer- und L ängsfugen Radlader mit B ürstenausbau zum Entfernen des Oberfl ächenm örtels 				
		Vermessung				
		- Messfahrzeug IRIS				
Beton		Unterbeton: C 30/37, XC4, XD3, XF4, XM2, C1, D _{max} = 22mm				
		Oberbeton: C 30/37, XC4, XD3, XF4, F2, D _{max} = 8mm				

Anhang

Die folgenden Impressionen wurden von der Fa. Schnorpfeil auf der Baustelle in Wittlich aufgenommen.



Abbildung 15-27: Wittlich Mischanlage und Lagerhaltung





Abbildung 15-28: Wittlich Einbau





Abbildung 15-29: Wittlich Lage der Baustelle/Mischanlage, Vorbereitungen mit Leitdraht und Dübeln sowie Fugenschnitt nach Einbau.

Anhang

<u>Analyse</u>

Die Baustelle wurde eingehend analysiert. Unter anderem wurden folgende Schritte betrachtet:

- Analyse der Prozesskette durch Auswertung Daten der Mischanlage und des Fertigers (selbe Messtechnik wie in Köln-Wahn)
- Auswirkung Längsebenheit durch Pinnabstand 10 m
- Oberflächenscans und Analyse Ebenheit
- Eine detaillierte Analyse der Baustelle ist im Arbeitspaket A zu finden.

15.5.4 Flughafen Köln-Wahn (Flugvorfeld)

Baustellenübersicht

Zeitraum		Einbau:	KW24-KW29 (HGT KW21) (11.6.18 bis 13.7.18)			
		Begehung:	28.06.2018			
Beteiligte	Partner	Schnorpfeil, Wi	rtgen, Liebherr, OAT			
vor Ort		Lehmann+Partr	ner			
Beteiligte	Partner	Schnorpfeil, Wi	rtgen, Liebherr, OAT,			
(Begehung/Ana- lyse)		Lehmann+Partner, ISYS, IWB, MPA				
Fahrbahn		Einbaustärke 38 cm (einlagig) auf HGT (gekerbt)				
		Einbaubreite 1 0m, Oberfläche Besenstrich				
Maßnahme		Einbau Fahrbahnbeton einschichtig, einlagig				
Maschinenp	bark	Wirtgen SP94				
		Liebherr Mobilmix 2.5-F – Tandemanlage (2 Stück) mit Litronic MPS III Steuerung sowie LWS 3 Messverstärker, in ca. 500m Entfernung (2 x 2,5 m ³)				
		Transport-LKW Muldenkipper jeweils 4 Chargen Beton				
		Fugenschneider für Quer- und Längsfugen				
		Oberflächenvermessung Messfahrzeug IRIS bzw. STIER				
Beton		TL Beton-StB, ZTV Beton-StB DIN 1045				
		C35/45 (LP) XC4,XD3,XF4,WS, Konsistenz C1, Größtkorn 2 2mm				
		Gesteinskörnung > 2mm, Basaltsplitt				
		CEM I 42,5N Zement, Luftporenbildner Pantapor 66				

Anhang

Impressionen

Die folgenden Impressionen geben eine Übersicht über die Baustelle (Quelle: ISYS).



Abbildung 15-30: Einbauort Köln-Wahn, Einbauplan und Lage zur Wetterstation



Abbildung 15-31: Mischanlage



Abbildung 15-32: Einbau



Abbildung 15-33: Frischbetonuntersuchungen



Abbildung 15-34: Fahrbahn

<u>Analyse</u>

Die Baustelle wurde eingehend analysiert. Unter anderem wurden folgende Schritte betrachtet:

- Gesamtbaustellendaten
 - o Rohmaterialien/-kennwerte
 - o Mischungsberechnung
 - Gesamtbewertung der Einbautage
- Eigenüberwachung Frisch/Festbeton
 - Konsistenz, w/z-Wert (einmal täglich)
 - o LP-Gehalt, Lufttemp (stündlich) an der Mischanlage
 - Rohdichte (Prüfkörper alle 1000 m²)
 - Dicke Decke (alle 200 m)
 - Profilgerechte Lage durch Leitdraht (20-25m Abstand)
 - Dübellage (durch Dübelkörbe gesichert)
- Fertiger
 - o Zeitreihendaten
 - Zeit
 - Betriebsdaten (Motoren, Hydraulik, ...)
 - Leitdrahtabweichung
 - Wetterstation (Temperaturen, Feuchte, Wind)
 - Positionsdaten (GPS, Radgeschwindigkeiten)
 - IMU Daten (Beschleunigung, Drehraten) + Neigungssensoren
- Mischanlage
 - o Zeitreihendaten
 - Zeit (GPS)
 - Verschluss Pegelsignale (Beschicker-, Zementwaagen-, Wasserwaagen-)
 - Temperaturen (Umgebung, Beton, Ausgangsstoffe)
 - Leistung Mischermotor
 - o Chargendaten
 - Zeit, Datum
 - Einwaage Zutaten, Volumen
 - Mischzeit
 - Chargengröße, Gesamtgewicht
 - Temperatur (Beton, Zuschläge, Umgebung)
 - Rezept, Eigenschaften
- Transport
 - o Keine detaillierte Überwachung aufgrund kurzer Distanz (500 m)
 - o Exemplarische Überwachung am 28.06.2018
 - o Herleitung aus Mischer und Fertigerdaten
- Nachbearbeitung
 - o Schnittprotokolle
- Oberfläche
 - CRG-Daten der Befahrungen
 - Trag- und Deckschicht

Eine detaillierte Analyse der Baustelle ist im Arbeitspaket A zu finden.

15.5.5 BAB A1 AS Salmtal - AK Wittlich – km 116,000 bis 109,000 (Wittlich II)

Baustellenübersicht

Zeitraum	Einbau:	20.09.2019 bis 28.10.2019				
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wirtgen, Liebherr, OAT,					
vor Ort (Maschinen, Messungen)	Lehmann + Par	tner				
Beteiligte Partner	Schnorpfeil, Wi	rtgen, Liebherr, OAT,				
(Analyse)	Lehmann + Par	tner, ISYS, IWB, MPA				
Fahrbahn	2-lagig – 20 cm	2-lagig – 20 cm Unterbeton – 6 cm Oberbeton (Waschbetonoberfläche)				
	Unterlage 10 cm Asphalttragschicht					
Maßnahme	Fertigung der Betonoberfläche (UB+OB) mit Waschbetonoberfläche					
Maschinenpark	2 x Gleitschalungsfertiger Wirtgen, Einbaubreite: 11,5 m					
	Liebherr Mobilmix 2.5-F – Tandemanlage (2 Stück) mit Litronic MPS III Steueru sowie LWS 3 Messverstärker, in der Nähe Einbau					
	Transport-LKW	Muldenkipper				
	Fugen- und Waschbetonherstellung					
	 Fugenschneider f ür Quer- und L ängsfugen Radlader mit B ürstenausbau zum Entfernen des Oberfl ächenm örtels 					
	Vermessung					
	- Messfa	hrzeug IRIS				
Beton	Unterbeton: C 30/37, XC4, XD3, XF4, XM2, C1, D _{max} = 22 mm					
	Oberbeton: C 30/37, XC4, XD3, XF4, F2, D _{max} = 8 mm					

<u>Analyse</u>

Die Baustelle wurde eingehend analysiert. Unter anderem wurden folgende Schritte betrachtet:

- Genauigkeit der Feuchtesonde für feine Gesteinskörnung
- Luftporengehalt an der Anlage, vor dem Fertiger und hinter dem Fertiger sowie Versuche mit verschiedenen Messverfahren
- Zuordnung einzelner Chargen von der Mischanlage zum Einbauort mit Bewertung der Verarbeitbarkeit
- Tachymetrische Aufnahme der Drahtanlage als Referenzhöhe
- Abgleich der Einbaustärke verschiedene Messsysteme (Puls-Induktions-Verfahren) / Bohrkern / Befahrung Lehmann + Partner
- Schnitt- und Ausbürstprotokolle
- Spaltzugfestigkeit am Festbeton
- Erweiterte Festbetonprüfung durch

- Prüfung der Lagegenauigkeit der Dübel
- Ebenheitsmessung mit verschiedenen Messsystemen (z. B. Planograf) sowohl Unterlage zu Betondecke → Fixpunkte f
 ür Lehmann + Partner
- Eine detaillierte Analyse der Baustelle ist im Arbeitspaket A zu finden.



Abbildung 15-35: Betoneinbauplan

15.5.6 A7 Hamburg

In Vorbereitung auf die gemeinsam untersuchten Baustellen fand bereits zu Beginn des Projektes eine Baustellenbegehung auf einem Bauabschnitt der A7 nördlich von Hamburg statt. Beteiligt waren daran die Fa. OAT sowie das ISYS und IWB. Ziel der Vorabbegehung war es, die Baustellenabläufe kennenzulernen sowie erste Eindrücke gerade auch im Gespräch mit den Baustellenarbeitern und -beteiligten zu sammeln. Dazu sind im Folgenden Eindrücke der Baustelle dargestellt (Quelle: ISYS).



Abbildung 15-36: Eindrücke bei Vorabbegehung in Hamburg

Im Zuge der erweiterten Messkampagne wurden vom IWB zudem 3 frei gewählte, von unterschiedlichen Bauunternehmen bediente Baustellen untersucht, die aber mit dem strikten Hinweis der ausführenden Bauunternehmen auf Anonymität nicht weiter beschrieben werden. Eine Darstellung ausgewählter Ergebnisse im zughörigen gemeinsamen Zwischenbericht erfolgt daher nur in anonymisierter Form. Die Summe der durchgeführten Tätigkeiten und Messungen sowie die Analyse und das Ziel waren nahezu deckungsgleich zu den gemeinsamen Baustellen. Der Zeitraum zur Erhebung der Messwerte umfasste dabei jedoch nur wenige Tage.

15.5.7 A9 Berlin

Zudem wurde von der MPA ein Streckenlos der BAB A9 – km 19+950, RiFa Berlin besucht und Bohrkerne entnommen.

Zeitraum	Einbau:	09.04.2018
	Begehung:	16.04.2018
	Analyse:	Entnahme von Bohrkernen

Beteiligte Partner vor Ort	MPA
Beteiligte Partner (Begehung/Ana- lyse)	MPA MPA
Maßnahme	Festlegung und Entnahme von Bohrkernen Durchmesser 350 mm

Anhang

Analyse Einfluss der Herstellung auf den Elastizitätsmodul

15.5.8 Flughafen Köln-Wahn (Sommer 2019)

Zeitraum	Einbau:	(07.05.19 – 16.07.19)			
Beteiligte Partner vor Ort	Schnorpfeil, OAT				
Fahrbahn	Einbaustärke 38 cm (einlagig) auf HGT (gekerbt)				
	Einbaubreite 10 m, Oberfläche Besenstrich				
Maßnahme	Einbau Fahrbahnbeton einschichtig, einlagig				
Maschinenpark	Wirtgen SP94				
	Liebherr Mobilmix 2.5-F – Tandemanlage (2 Stück) mit Litronic MPS III Steu- erung sowie LWS 3 Messverstärker, in ca. 500 m Entfernung (2 x 2,5 m ³)				
	Transport-LKW	Muldenkipper jeweils 4 Chargen Beton			
	Fugenschneide	r für Quer- und Längsfugen			
Beton	TL Beton-StB, ZTV Beton-StB DIN 1045				
	C35/45 (LP) XC4, XD3, XF4, WS, Konsistenz C1, Größtkorn 22 mm				
	Gesteinskörnung > 2 mm, Basaltsplitt				
	CEM I 42,5N Ze	ment, Luftporenbildner Pantapor 66			

15.5.9 AS Leipzig – AD Schkeuditz BAB A14

Bei einer weiteren Baumaßnahme wurden auf einer Gesamtlänge von 8,5 km durch die MPA Bohrkerne im Standstreifen zur Bestimmung von Festbetoneigenschaften entnommen. Die Betonbefestigung wurde rechnerisch nach RDO Beton dimensioniert. Der Streckenabschnitt wurde in Waschbetonweise sowie in Grindingbauweise ausgeführt.



Abbildung 15-37: Im September 2019 fertiggestellte Betonfahrbahndecke zwischen AS Leipzig und AD Schkeuditz, links in Waschbetonbauweise, rechts in Grindingbauweise.

Zeitraum	Einbau:	Juni – September 2019			
	Begehung:	15.10.2019			
	Analyse:	Bestimmung von Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, zentrische Zugfestigkeit und statischer Elastizitätsmodul)			
Beteiligte Partner vor Ort	MPA und Hochschule Anhalt (Bohrkernentnahme)				
Beteiligte Partner	MPA				
Maßnahmen	Entnahme von Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm mit anschließende				
	Ermittlung von I	Festbetoneigenschaften.			

15.5.10 Flughafen Stuttgart

Bei einer Baustelle am Flughafen Stuttgart im Frühjahr 2020 wurde die östliche Start- und Landebahn auf einer Länge von 1200 m der insgesamt 3345 m und einer Breite von 45 m teilerneuert. Der Abschnitt wurde in Waschbetonbauweise mit einer Stärke von 40 cm in C35/40, einschichtig auf einer HGT ausgeführt. Im Zug der Arbeiten wurden von der MPA während der Herstellung Frischbetonproben entnommen, um die Erstarrung und Erhärtung des Betons mit Ultraschallmessungen mitverfolgen zu können.



Abbildung 15-38: Teilerneuerung der östlichen Start- und Landebahn am Flughafen Stuttgart im April 2020

Zeitraum:	Einbau:	20.04.2020	
Beteiligte Partner vor Ort:	MPA		
Maßnahmen:	Einbau Fahrbahnbeton mit Fertiger auf STS, einschichtig, einlagig		
Analyse:	Frischbetonmessung mit FreshCon. Zeitliche Mitverfolgung des Erhärtungsvortschritts über 72 Stunden		