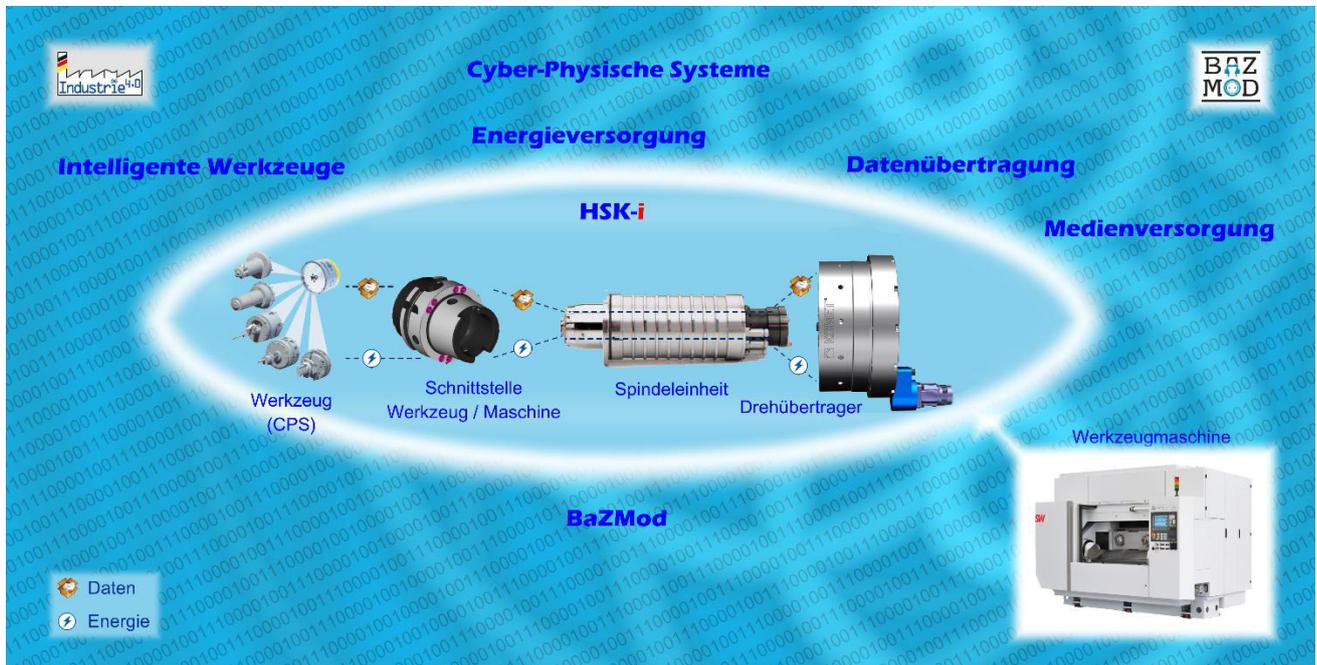


Forschungsbericht

zum Verbundprojekt

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

Kurztitel: **BaZMod**



Verbundpartner:

KOMET Group GmbH (Projektkoordination)

MAPAL Dr. Kress KG

Blum-Novotest GmbH

Renishaw GmbH

SW – Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH

Franz Kessler GmbH

Hainbuch GmbH

Röhm GmbH

Trigerion UG

*Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW),
Universität Stuttgart*

Institut für Werkzeugmaschinen (IfW), Universität Stuttgart

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

08.11.2017

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ2630 bis 02PJ2639) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

0 Inhalt

0	Inhalt	3
1	Kurzbeschreibung	4
2	Ausgangslage	5
3	Ziele des Verbundprojekts.....	6
3.1	Gesamtprojektziel	6
4	Stand der Wissenschaft und Technik.....	8
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik; alternative Lösungen.....	8
4.2	Schwerpunkte der Verbundprojektpartner.....	13
5	Ergebnisse	14
5.1	AP 1: Anforderungsanalyse und -definition	15
5.2	AP 2: Entwicklung technischer Lösungsansätze	19
5.3	AP 3: Entwicklung informationstechnischer Ansätze.....	34
5.4	AP 4: Prototypische Umsetzung.....	43
5.5	AP 5: Validierung und Transfer	52
5.6	Ergebnistransfer und Zusammenarbeit mit Verbundprojekten Industrie 4.0	54
6	Verwertung der Ergebnisse	55
6.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	55
6.2	Wissenschaftliche Erfolgsaussichten	58
7	Literatur	60
8	Anhang.....	62

1 Kurzbeschreibung

Auf modernen Werkzeugmaschinen wird eine steigende Zahl von Optionen zur Verbesserung der Qualität und zur Erweiterung der Bearbeitungsmöglichkeiten eingesetzt, z.B. Messmittel, aktorische Werkzeuge, Beschriftungsapparate und Werkzeuge, die mit Sensoren zur Prozessüberwachung und -optimierung ausgerüstet sind. All diese Optionen benötigen Energie- und Kommunikationsschnittstellen zur Werkzeugmaschinensteuerung. Diese sind heute herstellerbezogen und müssen jeweils individuell installiert und in der Maschinen-Software programmiert werden. Die Integration von Optionen wird dadurch eingeschränkt und der Kostenaufwand fällt jeweils individuell an. Standardisierte Schnittstellen und sich automatisch konfigurierende Systeme (CPS) sind erforderlich, um die Innovationspotentiale zu heben.

Durch Schaffung von herstellerunabhängigen, standardisierten Schnittstellen an Werkzeugmaschinen-spindeln und zu Maschinensteuerungen sollen unterschiedliche Zusatzmodule als Cyber-Physische Systeme leicht in Werkzeugmaschinen integrierbar sein. Die elektromechanischen Verbindungen sollen möglichst umfassend standardisiert und Softwaremodule so vor-konfiguriert werden, dass sie CPS automatisch identifizieren und einbinden können („Plug & Produce“). Neben bereits bekannten Zusatzmodulen bildet die Standardisierung die Basis für neue Anwendungen mit intelligenten Sensoren, Aktoren und Verfahren, die sich bisher wegen des hohen Integrationsaufwandes nicht realisieren lassen.



Abbildung 1: Selbstkonfigurierende Zusatzmodule für Werkzeugmaschinen (KOMET, Mapal)

Realisiert werden sollen standardisierte Schnittstellen in Werkzeugmaschinen-spindeln, die es ermöglichen, Cyber-Physische Systeme, z.B. Werkzeuge mit Sensoren und Aktoren automatisch anzukoppeln. Die Energie- und Datenübertragung wird berührungslos und standardisiert am gegenüberliegenden Ende der Spindel realisiert. Zur Ankopplung an die Maschinensteuerung wurden Interfacemodule entwickelt, die die Hard- und Software zur Kommunikation mit der Maschinensteuerung beinhalten. Für die jeweilige Maschinensteuerung werden Softwarebausteine entwickelt, die Zusatzkomponenten (CPS) identifizieren und diese automatisch in der Steuerung konfigurieren können.

Durch herstellerunabhängige Standardmodule können Werkzeugmaschinen zusätzliche Prozessschritte aufnehmen, welche die Einsatzmöglichkeiten erweitern, die Fertigungsqualität verbessern und die Wirtschaftlichkeit erhöhen, indem Kosten und Durchlaufzeiten sinken. Dadurch werden die internationale Wettbewerbsfähigkeit in der Produktion sowie die der Werkzeugmaschinenhersteller durch innovative und leistungsfähigere Maschinen deutlich gesteigert.

2 Ausgangslage

Der Trend zu immer höherer Flexibilität in der Fertigungstechnik führt dazu, dass auch immer mehr Prozessschritte innerhalb eines Bearbeitungszentrums (BAZ) durchgeführt werden müssen. Nur so lassen sich qualitativ hochwertige Werkstücke ohne Umspannen bei gleichzeitiger Kosteneffizienz fertigen. Dazu müssen innerhalb eines Bearbeitungszentrums komplexe Fräs-, Bohr- und auch Drehoperationen durchgeführt werden können (Abbildung 2). Wünschenswert wären Alternativlösungen zu teuren und bauteilspezifischen Transferstraßen oder Rundtaktsystemen, die auch ein späteres Nachrüsten, abhängig von den zu fertigenden Teilespektren, erlauben. Insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen sind Transfersysteme oder mehrspindlige Bearbeitungszentren nur schwer zu finanzieren. Dies ist besonders dann der Fall, wenn deren Potential nicht immer voll ausgeschöpft werden kann.

Die erforderliche Flexibilität kann beispielsweise durch zusätzliche Aussteuerwerkzeuge, die in die Maschine als Zusatzachsen eingewechselt werden, erreicht werden. Geregelt Aussteuerwerkzeuge bieten hier völlig neue Freiheitsgrade für die Fertigung. So sind auf einem Standard-Bearbeitungszentrum neben Kontur- auch Drehbearbeitungen mit hoher Qualität möglich. Die Maschinenkonfiguration kann durch das Aussteuerwerkzeug entsprechend den Anforderungen an die Bearbeitung abhängig vom Werkstück geändert werden. Dazu sind jedoch unter Anderem spezifische Vorrüstungen in der Spindel-Schnittstelle zur Werkzeugaufnahme bzw. zur Steuerung notwendig. Darüber hinaus müssen die Zusatzachsen in der Steuerung berücksichtigt werden können.

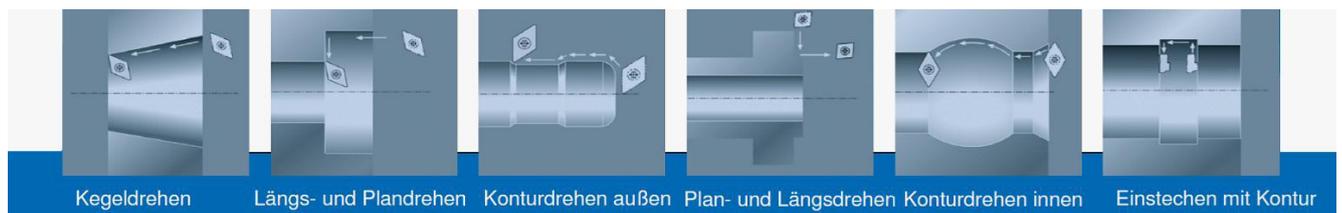


Abbildung 2: Drehoperationen in Fräszentren (Quelle: KOMET)

Neben dem durch zusätzliche Drehoperationen erweiterten Einsatzspektrum von ein- oder mehrspindligen Bearbeitungszentren gibt es eine Vielzahl an weiteren Anwendungen, die Schnittstellen zur Spindel bzw. zur Steuerung nutzen können. Exemplarisch seien hier Messdorne und -taster erwähnt, die in die Spindelnase eingewechselt werden können und die erfassten Messgrößen drahtlos an einen auswertenden Zusatzrechner oder an die Steuerung weitergeben. Durch die Datenübertragung können die aufgenommenen Informationen mit Hilfe der Steuerung verarbeitet und in Reaktionen bezüglich des Fertigungsprozesses umgesetzt werden. Dies kann mittels direkt (über das aktorische Werkzeug) oder weitläufig (über die Steuerung der Werkzeugmaschine) geschlossener Regelkreise erfolgen.

Auffällig ist, dass hier ein gemeinsames Problem in der Übertragung der produzierten Daten auf den nicht rotierenden Teil der Werkzeugmaschine (WZM) besteht. Aktuell nutzen derartige Zusatzsysteme von Drittanbietern eigene Übertragungswege mit eigener Hardware und eigener Formatierung.

Um diese Applikationen in der Maschinenkonfiguration wirtschaftlich einzusetzen und deren Potenziale vollumfänglich nutzen zu können, sind die einzuwechselnden „intelligenten“ Werkzeuge oder Messsysteme als Cyber-Physische Zusatzmodule zu gestalten. Sie müssen sich über universell definierte Schnittstellen in die Werkzeugmaschine einbinden lassen und unabhängig vom Hersteller Energie und Informationen mit der Maschine austauschen können. Somit können sie auf ihre Umwelt, die Maschine und das Werkstück reagieren. Wenn sie ihre

Funktionen weitestgehend autark erbringen, können sie universell angesprochen werden und es ist keine spezifische Anpassung am Bearbeitungszentrum für jeden Typ eines solchen Zusatzmoduls notwendig. Durch solche Cyber-Physische Zusatzmodule können neben dem reinen Aussteuern von Schneiden als Zusatzachsen bei der Zerspanung komplette Prozesse und Messverfahren zusätzlich in die Maschine eingewechselt werden. Dadurch übertrifft eine solche Lösung die Potenziale von bisherigen Fertigungslösungen bei geringeren Kosten.

Motivierend kommen die Potenziale hinzu, die bei gleicher Vorgehensweise auf der Werkstückseite abzuschöpfen wären. Bei verketteten BAZ kommen zunehmend an Stelle von Nullpunktspannsystemen HSK Schnittstellen als genauigkeitsbestimmende Elemente zum Einsatz. Wenn in diese, analog zur Vorgehensweise an der Spindel, eine Energieschnittstelle mit bidirektionaler Datenschnittstelle zur Verfügung stünde, wäre eine Einbindung der Werkstückvorrichtung in geschlossene Regelkreise möglich.

Ein Schlüsselement zur Flexibilisierung bzw. Einsatzerweiterung von Bearbeitungszentren stellt die zuverlässige Medienversorgung zum Betrieb der Cyber-Physischen Systeme an der Spindel dar. Ein weiterer essentieller Aspekt zum Einsatz der Cyber-Physischen Zusatzsysteme ist der Zugang zur Steuerung der Werkzeugmaschine. Ähnlich der Werkzeugverwaltung muss die Steuerung in die Lage versetzt werden, aktorische, geregelte oder gesteuerte Anwendungen zu unterscheiden bzw. selbsttätig die notwendigen Konfigurationsschritte vorzunehmen.

3 Ziele des Verbundprojekts

3.1 Gesamtprojektziel

Die Systembetrachtung heutiger Bearbeitungszentren zeigt, dass für den einheitlichen Betrieb Cyber-Physischer Zusatzsysteme Kommunikationsstandards zwischen der NC-Steuerung und der Werkzeugmaschine mit Spindel und Werkzeug bzw. mit Werkstückspannung und Werkzeug nicht vorhanden sind (Abbildung 3). Neben bisherigen Anwendungen, wie ansteuerbare Achsen, soll diese Schnittstelle zwischen Maschine, Spindel und Werkzeug auch die Basis für neue intelligente Sensoren, Aktoren und Verfahren schaffen, die bisher nur mit aufwendigen Zusatzaggregaten realisiert werden konnten.

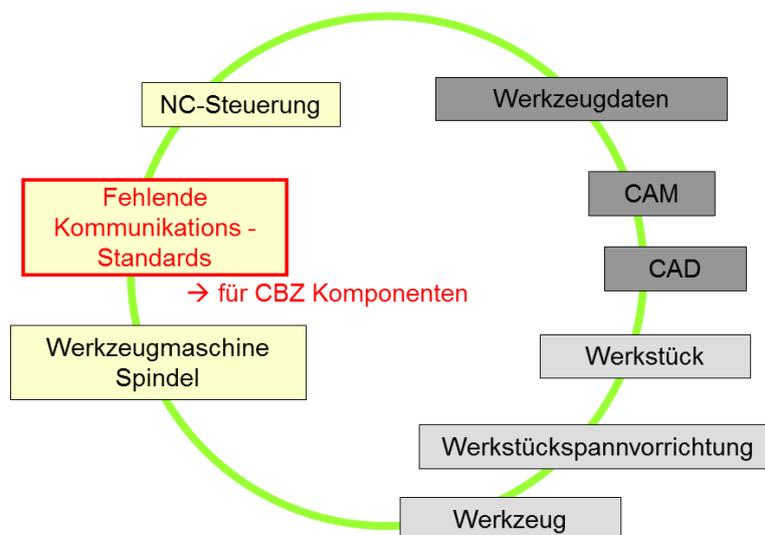


Abbildung 3: Systembetrachtung für die Plattformdefinition Cyber-Physischer Zusatzmodule

Das Hauptziel des Verbundprojekts BaZMod ist die Schaffung eines Schnittstellenstandards im Bereich der spanenden Bearbeitung für Cyber-Physische Zusatzmodule. Dazu ist die Entwicklung einer einfachen, wirtschaftlichen und standardisierten Schnittstelle zwischen Maschine und Cyber-Physischem Zusatzmodul notwendig. Diese muss herstellernerutral sein und dabei unkompliziert, schnell und kostengünstig in die Maschine integrierbar sein.

Um dieses Ziel zu erreichen sind unter anderem die folgenden Teilziele bzw. -ergebnisse notwendig, welche zugleich in Abbildung 4 am Beispiel einer rotierenden Spindel anschaulich verdeutlicht sind:

- Genaue Anforderungsdefinition an die CPS und die Schnittstelle.
- Neben der Datenanbindung müssen auch Fluide übertragen und herkömmliche Werkzeughalter eingesetzt werden können.
- Definition einer Hardware-Softwarearchitektur zur Integration Cyber-Physischer Systeme in Werkzeugmaschinen.

Um die vielen heterogenen Bearbeitungsprozesse und Werkzeuge einfach an die Maschinensteuerung und die nachgeschalteten Kommunikationsprogramme anbinden zu können, ist das Prinzip Plug & Produce von entscheidender Bedeutung. So muss das Cyber-Physische Modul beim Einwechseln automatisch von der Steuerung erkannt, die Daten abgeglichen und die Verbindung von Daten- und Energieübertragung geprüft werden. Insbesondere für kleinere und mittlere Unternehmen ist das Plug & Produce-Prinzip von größter Bedeutung, da hier Prozesse schnell implementiert und angewendet werden müssen, ohne dass auf großes Fachwissen oder sogar Fachabteilungen zurückgegriffen werden kann. Besonders erstrebenswert ist hierbei der herstellerunabhängige Steuerungszugang. Dieser stellt generell für Drittanbieter regelmäßig eine Herausforderung dar, da die Formatebene der digitalen Schnittstellen aus naheliegenden Gründen Dritten nicht offengelegt wird. Der zeitliche Aufwand für u. A. die Weiterbildung von Fachkräften reduzierte sich durch einen einheitlichen Standard und die daraus resultierende Vereinfachung des Systems merklich.

- Entwicklung intelligenter Schnittstellen zur durchgängigen Energie- und Datenübertragung.

Die Funktionen und die Anbindung an die Maschine über die Schnittstelle müssen auch bei hohen Drehzahlen robust erbracht werden können. Für die Entwicklung müssen Soft- und Hardwareschnittstellen standardisiert werden. Wenn Daten und größere elektrische Leistungen gleichzeitig übertragen werden, muss darauf geachtet werden, dass sich diese nicht gegenseitig beeinflussen. Das System muss daher auch eine hohe Störsicherheit aufweisen.

Der Betrieb in der realen Produktionsumgebung stellt hohe Anforderungen an die Schnittstelle selbst. Fluide, Späne, Stäube, Temperaturunterschiede und andere Einflüsse müssen zuverlässig von der Schnittstelle ferngehalten werden, um eine stabile und zuverlässige Kontaktierung und Vernetzung der Systeme zu gewährleisten. Standardwerkzeugaufnahmen müssen darüber hinaus weiterhin einsetzbar bleiben. Neben dem Schutz der Schnittstelle selbst muss der Bediener geschützt werden, insbesondere wenn höhere Ströme übertragen werden. Werden Daten über die Maschinengrenze hinaus übertragen, muss darauf geachtet werden, dass die Kommunikation zuverlässig funktioniert, eine Sicherheit gegen unbefugte Manipulation besteht und ein unbeabsichtigtes Auslösen von Funktionen mittels Sicherheitsmechanismen verhindert wird.

- Weiterentwicklung von Motorspindeln, welche die standardisierten Schnittstellen integrieren.
Die Steifigkeit und Genauigkeit des Systems darf bei der Nutzung des bisher vorhandenen Bauraums nicht beeinträchtigt werden. Durch die Schnittstellen an Spindel und Werkzeugaufnahme werden diese zwangsweise lokal geschwächt und eine konstante Steifigkeit über dem Umfang ist nicht mehr gegeben. Dies würde zu einer Schwingungsanregung führen. Eine durchgängige Modellierung und Simulation während der Entwicklung des Systems soll und kann dies verhindern.
- Weiterentwicklung eines modularen Adapterflansches zur Nachrüstung bestehender Systeme.
- Weiterentwicklung der Cyber-Physischen Module.
- Neben den Schnittstellen gilt es, das Cyber-Physische Modul selbst zu konzipieren. Dazu sind Energiewandlungen sowie Antriebs-, Sensor- und informationsverarbeitende Komponenten auf kleinstem Raum innerhalb des Werkzeugs unterzubringen.
- Entwurf eines modularen Reglerbauskastens und einer Methodik zur automatischen Konfiguration eines mechatronischen Werkzeuges.

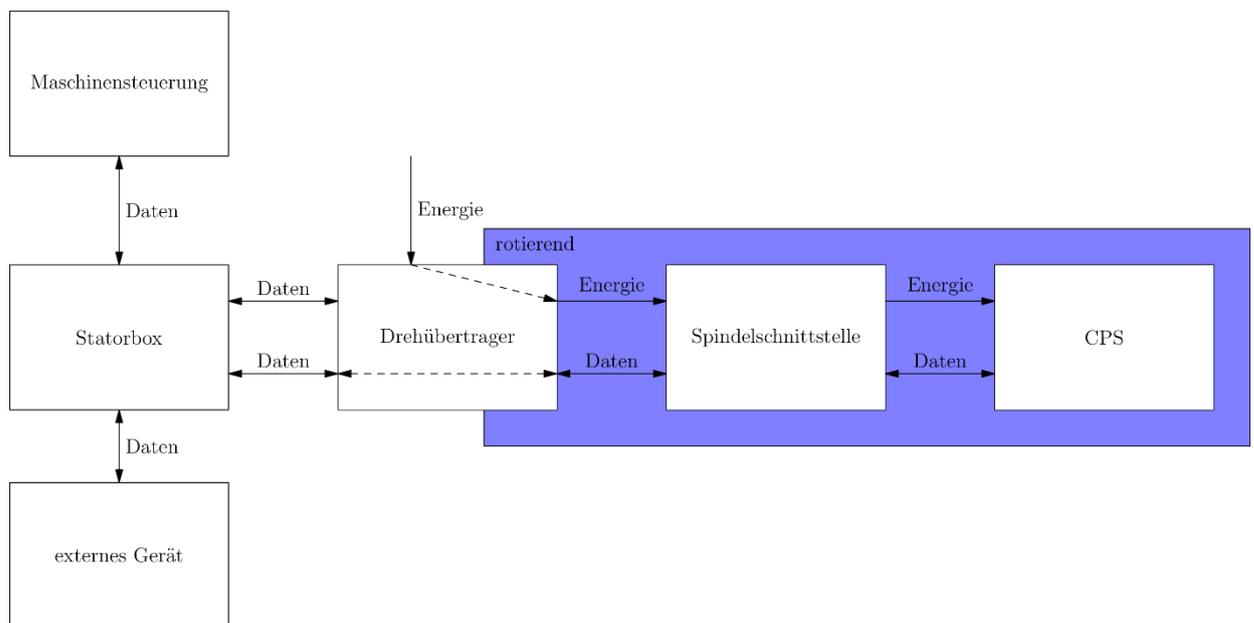


Abbildung 4: Schnittstellen am Beispiel rotierender Spindeln

4 Stand der Wissenschaft und Technik

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik; alternative Lösungen, Informationsrecherchen

Werkzeug und Messsystem als aktive Zusatzmodule

Auf dem Markt sind unterschiedliche Lösungen verfügbar, beispielsweise für angesteuerte U-Achsen. Diese werden über einen separat in der Maschine angebrachten Stator mit Energie und Informationen versorgt und leiten ihrerseits über diese drahtlose Verbindung Informationen zurück an die Steuerung. Jedes System arbeitet hierbei mit einem separaten Netzteil und unterschiedlicher spezifischer NC-Anpassung, weshalb die Systeme zwar prinzipiell ähnlich, aber nicht kompatibel sind. Ferner muss jedes System individuell an die SPS angepasst und

mittels unterschiedlicher NC-Befehle angesteuert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass Kapazitäten und entsprechendes Erfahrungswissen bei den Inbetriebnehmern bereitstehen. Neben Interoperabilitätsproblemen mit anderen Aggregaten wird für die Steuerung der Zusatzachsen Platz im Schaltschrank benötigt.

Für die Fertigung selbst stellt jedoch der Stator die größte Problematik dar. Er muss direkt neben bzw. hinter der Zusatzachse in der Nähe der Spindelnase angebracht werden. Diese Störkontur muss bei der NC-Programmerstellung berücksichtigt werden und verringert den effektiv nutzbaren Arbeitsraum. Insbesondere wenn die Zusatzachse gegen ein herkömmliches Werkzeug ausgewechselt wird, verbleibt der Stator als Störkontur im Arbeitsraum und schränkt die Verfah- und Bearbeitungswege mitunter deutlich ein.



Abbildung 5: U-Achse mit Stator und Kabelintegration, U-Achs-Systeme (Quelle Mapal, KOMET)

Ähnlich wie bei aktorischen Achsen stellt sich die Situation bei den einwechselbaren Messsystemen (Blum, Renishaw) dar. Jeder Hersteller hat prinzipiell ähnliche, aber nicht grundsätzlich kompatible Übertragungsstrecken zur Verfügung. Insbesondere lässt der Status quo keine herstellerunabhängige Anwendungserweiterung zu. Dieser Missstand ist als wesentlicher Hinderungsgrund für die Akzeptanz solcher Systeme zu sehen. Nicht unerwähnt sollten die Forderungen bleiben, die aus umweltschutztechnischen Gründen eine hydraulikfreie WZM (Grob, SW) verlangen. Um Energieeinsparungen durch Hydraulikverzicht zu erreichen, wird zunehmend an elektrischen Werkzeug- und Werkstückspannvorrichtungen gearbeitet (Röhm, Hainbuch).

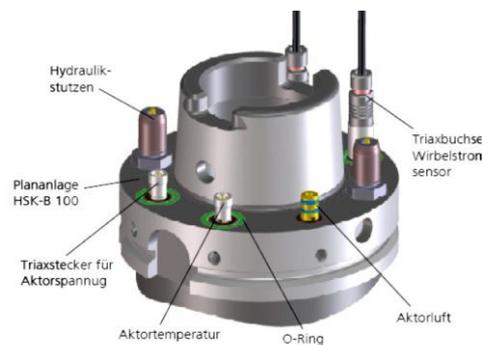


Abbildung 6: Kommunikation über HSK, Projektansatz KOMET und RWTH Aachen (iBo, intelligentes Bohren)

Forschungsseitig sind derzeit in Bezug auf diese Problemstellung nur wenige Aktivitäten vorhanden. Am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen beschäftigt sich der industriefinanzierte "Arbeitskreis Werkzeugschnittstelle" mit den mechanischen Eigenschaften der vorhandenen Werkzeugschnittstellensysteme, ohne allerdings aktive Komponenten mit einzubeziehen. Am Fraunhofer IWU in Chemnitz wurde die Schnittstelle eines Drehwerkzeugs dahingehend modifiziert, dass die KSS-Zuführung über die Schnittstelle realisiert werden kann [1]. Diese ist allerdings nicht auf aktive Werkzeuge übertragbar. Im Rahmen des vom BMWi geförderten InnoNet-Projektes 16IN0324 "iBo – Intelligentes Bohrwerkzeug für die Herstellung und Strukturierung von Präzisionsbohrungen mit großen Durchmessern" (siehe auch Abbildung 6) wurde eine derartige Schnittstelle unter Mitarbeit von einem der Antragsteller (KOMET)

unter Verwendung des HSK-Standards erarbeitet. Hier können neben elektrischer Leistung auch Sensorsignale und Hydraulikmedien über die Schnittstelle transportiert werden. Diese Schnittstelle ist jedoch speziell für den betrachteten Anwendungsfall des strukturierten Bohrens zugeschnitten und kann nicht oder nur stark eingeschränkt auf andere Bearbeitungsprozesse übertragen werden.

Energie-, Daten- und Medienübertragung auf (schnell) rotierende Teile

Die Zufuhr von Medien wie beispielsweise Kühlschmierstoff (KSS), Minimalmengenschmierstoffe (MMS, i.d.R. Druckluft-Öl-Gemische), Druckluft oder neuerdings auch kryogene Kühlstoffe erfolgt in der Regel vom hinteren Spindelende über die Spann-/Zugstangen-Zentralbohrung nach vorne zum HSK. Zur Einleitung in die rotierenden Teile werden Drehdurchführungen benutzt. Der Stand der Technik lässt Drehzahlen bis 30.000 min⁻¹ bei Drücken von 300 bar ohne größere Probleme zu. Für noch höhere Drehzahlen existieren Drehdurchführungen mit speziellen, aber teuren Dichtringsätzen. Eine Durchleitung von Fluiden durch weiter außen liegende axiale Bohrungen in der Spindel-Hohlwelle selbst anstatt durch das Zentrum ist ebenfalls möglich, es treten hier aber Fliehkraft- und Corioliseffekte auf, die berücksichtigt werden müssen, da das Fluid in radialen Kanälen tangential beschleunigt werden muss. Generell wird die Durchleitung von Fluiden und Medien durch das Projekt BaZMod nicht grundlegend verändert, so dass hier auf den Stand der Technik zurückgegriffen werden kann.

Eine Leistungs- bzw. Energieübertragung über die Spindelwelle hinweg zur Wirkstelle am Werkzeug kann elektrisch, mechanisch oder fluidisch – bspw. hydraulisch – erfolgen. Mechanische Systeme sind bekannt in Form von innenliegenden Antriebswellen, welche über eine Klauenkupplung im Zentrum des HSK eine Leistungsübertragung in das Werkzeug ermöglichen – unabhängig von der Rotation des Werkzeugs selbst. Die Leistungsübertragung auf fluidhydraulischem Weg erfolgt ähnlich zur Übertragung von KSS-Medien durch Kanäle innerhalb der Spindel bei Einleitung mittels Drehdurchführungen am hinteren Spindelende.

Die elektrische Übertragung kann grundsätzlich am werkzeugseitigen Ende oder am rückwärtigen Ende der Spindel angeordnet werden. Die Energieübertragung kann berührend über Schleifkontakte oder durch geeignete Gestaltung von Stator und Rotor eines Drehübertragers auch berührungslos stattfinden. Ein Nachteil der berührungslosen Energieübertragung besteht in der Begrenzung der elektrischen Leistung. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass ein segmentförmiger, kleiner Stator eingesetzt wird. Bei gängigen Durchmessern des Systems ist die übertragbare elektrische Leistung auf ca. 100 bis 150 Watt begrenzt. Diese Leistung reicht zwar aus, um Werkzeuge mit mechanischen Aktuatoren für die Schneidenverstellung und deren Steuerung und Regelung auch bei den heute gängigen hohen Spindeldrehzahlen in der Größenordnung von bis zu 20.000 Umdrehungen pro Minute zu betreiben. Für weitere Arbeitsschritte und Verfahren wie Reinigen, Schweißen, Härten, Beschichten und Beschriften werden aber z.T. deutlich höhere Leistungen benötigt (mehrere kW).

Die direkte Übertragung elektrischer Energie in das rotierende System über Schleifkontakte oder Schleifringe wird für hohe Leistungen appliziert. Diese Technik ist verschleißbehaftet und neigt zu Störungen, insbesondere kurzzeitigen Spikes im Stromfluss oder gar Funkenbildung. Vorteil ist die hohe Energiedichte und die hohe Leistung.

Für kleinere Leistungen ist der Stand der Technik die berührungslose, induktive Übertragung der elektrischen Energie von einem maschinengestellfesten, segmentförmigen Stator nahe der Spindelnase auf einen mit dem Werkzeug verbundenen Rotor. Die für die induktive Energieübertragung notwendigen Primär- und Sekundärspulen sind im Stator bzw. Rotor angeordnet. Der induktive Drehübertrager kann zusätzlich auch zur Übertragung von Daten verwendet werden. Dazu können die Datensignale entweder dem Wechselstrom für die Energieübertragung

aufmoduliert oder über zusätzliche Datenwicklungen auf einer getrennten Datenstrecke übertragen werden. Eine weitere bekannte Anordnung der Drehübertrager für die berührungslose Energieübertragung ist am rückwärtigen Ende der Maschinenspindel. Die vom Rotor des Drehübertragers aus zum Maschinenwerkzeug zu übertragende elektrische Energie wird über elektrische Leiter durch die Maschinenspindel hindurchgeleitet und an einer mitdrehenden elektrischen Kontaktstelle am HSK in das Werkzeug eingekoppelt.

In Patentschriften [2] werden auch neuartige elektrische Drehübertrager erwähnt, welche aus zwei leitenden, koaxial angeordneten und zur Umgebung abgedichteten und isolierten Ringen bestehen, deren Spalt mit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit gefüllt ist. Der innere Ring befindet sich auf dem drehenden Teil, der äußere steht fest. Diese Technik ist im Gegensatz zu Schleifkontakten nicht verschleiß- und störungsbehaftet, dafür aufwändiger.

Modulare Maschinen- und Steuerungsarchitekturen

Im aktuellen Forschungsprogramm SPP 1476 der DFG wird die Austauschbarkeit der Funktionseinheiten an Maschinen nicht als Grenze zur Modularisierung gesehen. Die gesamte Maschine ist in unterschiedliche Module aufgeteilt (Maschinengestell, Vorschubmodul mit Antrieben, Prozesseinheit, Versorgung) und Schnittstellen werden definiert. So kann beispielsweise ein neues Vorschubmodul mit anderen Antrieben auf ein in der Größe geändertes Maschinengestell integriert werden. In diesem Forschungsprogramm werden auch die Schnittstellen der einzelnen Module betrachtet. Es können über bestimmte Anschlüsse gleichzeitig Daten und Energie übertragen werden [3].

In der Industrie ist die Modularisierung der Maschine nach Anbauteilen (Funktionen) weit verbreitet. Als Beispiel dient die HOMAG BMG500 und BMG600 Serie. Als Grundlage wird eine festgelegte Stationärmaschine mit Portal mit Gantry-Achse und 5-Achs-Fräskopf verwendet. Auf dem Fräskopf bzw. dem Y-Schlitten am Portal können nun Bearbeitungsmodule aus einem großen Baukasten befestigt werden. Als Beispiel sei hier die Kappsäge oder das Bohraggregat mit 15 Bohrern genannt. Zusätzlich können mehrere mitfahrende Werkzeugmagazine am Portal befestigt werden, die auf dem Fräskopf verschiedene Werkzeuge befestigen können. Der Vorteil dieser Art der Modularisierung liegt darin, dass der Hersteller als Basis eine weitgehend optimierte Grundkinematik einsetzt. Tiefergehende Modularisierung findet jedoch nicht statt.

Offenheit und Modularität auf Steuerungsebene bieten z.B. Siemens, Fanuc und Beckhoff an. Es steht dem Anwender frei, Code auf Ebene der SPS, der HMI oder sogar auf Programmier Ebene auszuführen. Dies gewährt dem Anwender eingeschränkten Eingriff in die Steuerungssoftware und ermöglicht es, modular weitere Funktionen hinzuzufügen [4].

Eine weitere Möglichkeit Modularität für Steuerungen zu integrieren ist im europäischen Verbundprojekt OSACA definiert. Ziel war es hier eine herstellerübergreifende Steuerungsarchitektur zu entwickeln. Portabilität, Erweiterbarkeit, Austauschbarkeit, Skalierbarkeit und Kombierbarkeit sind die definierten Eigenschaften von OSACA. Die offenen Schnittstellen wurden jedoch bisher hauptsächlich intern genutzt und nicht dem Anwender zur Verfügung gestellt [5].

Rekonfigurierbare Maschinensysteme mit Plug&Produce-Technologie

Wandlungsfähigkeit, also das Vermögen von Systemen sich organisatorisch und produktionstechnisch Veränderungen anzupassen, wird zunehmend als Eigenschaft von Produktionssystemen gefordert. Auf Maschinenebene bedeutet dies, dass die Maschinen selbst an geänderte Produktionsbedingungen angepasst werden können. Dies kann entweder durch konstruktive Änderungen geschehen oder indem bei einer modular gestalteten Maschine Module ausgetauscht, hinzugefügt oder entfernt werden. Da hier die Konfiguration einer Maschine geändert wird, spricht man hier von einer rekonfigurierbaren Maschine [6]. Auf diese Weise kann die

Struktur, Produktionskapazität oder Fertigungstechnologie einer Produktionsmaschine schnell an neue Anforderungen angepasst werden. Rekonfigurationen müssen dabei in einem Minimum an Zeit durchgeführt werden, damit keine Produktionskapazität verloren geht und Produktionseinnahmen ausfallen. In den vergangenen Jahren wurden bereits einige Maschinenkonzepte entwickelt [7], [8], [9] die diese Eigenschaften erfüllen.

Konsequente Modularisierung ist das Basiskonzept im Bereich der rekonfigurierbaren Produktion. Eng gekoppelte Funktionalitäten werden in Modulen zusammengefasst, die über Schnittstellen miteinander verbunden werden. Durch die Modularisierung entstehen neue Modulgrenzen, wodurch ein interdisziplinärer Zusammenschluss von mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Funktionalität entsteht [10]. Die neu entstandenen Einheiten werden daher auch mechatronische Module genannt.

Abbildung 7 zeigt eine rekonfigurierbare Produktionsmaschine am Beispiel eines Fräszentrums. Das Fräszentrum ist hier aus Modulen aufgebaut, welche die klassisch benötigten Funktionalitäten umsetzen. Vorhanden sind Bewegungsachsen, Bearbeitungsaggregate ein Werkzeugwechsler sowie ein Steuerungssystem. Beispiele für die Rekonfiguration einer solchen Maschine sind der Tausch oder das Hinzufügen von Achsen, des Werkzeugverwaltungssystems oder von Bearbeitungsaggregaten. Mechanische und elektronische Schnittstellen von mechatronischen Modulen wurden in der Vergangenheit bereits ausgiebig erforscht [11], [12]. Allerdings besteht im Bereich der informationstechnischen Eigenschaften noch Forschungsbedarf [13]. Vor allem wenn die modulinterne Informationstechnik für die Unterstützung der Inbetriebnahme und weiterer flexibler Funktionalität genutzt werden soll.

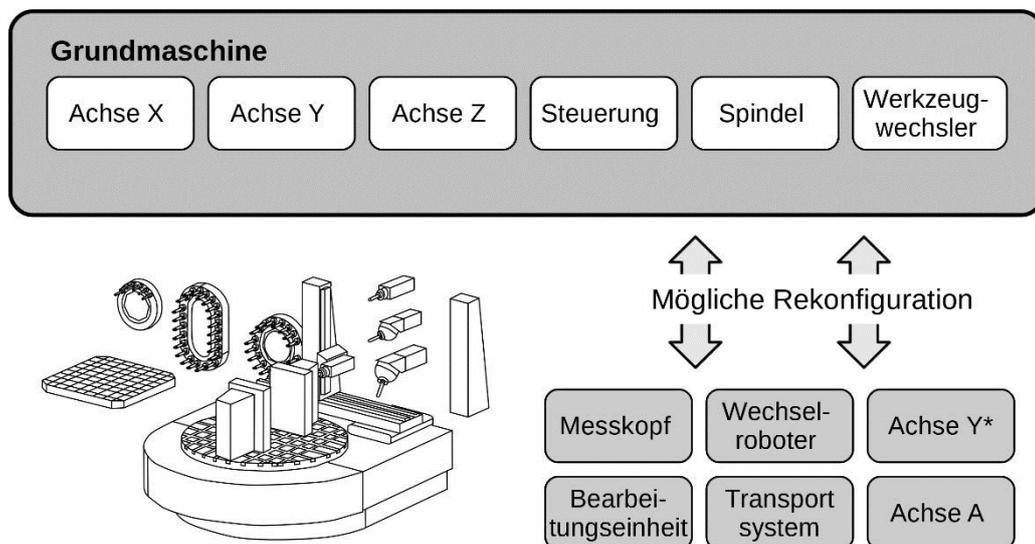


Abbildung 7: Rekonfigurierbare Werkzeugmaschine mit verschiedenen Austauschmodulen

Zur Inbetriebnahme zählen die letzten Arbeitsschritte, bevor eine Maschine in Betrieb gehen kann. Daher ist die Inbetriebnahme eine der kompliziertesten, arbeitsaufwendigsten und daher auch kostenintensivsten Arbeitsschritte. Nach dem Wiederaufbau eines Maschinensystems muss das Gesamtsystem erneut in Betrieb genommen werden. Dies bedeutet zum Beispiel die Einstellung von Betriebsparametern, Anpassungen in der Konfiguration der Steuerungssoftware sowie in der Feldbuskommunikation. Anschließend müssen alle Funktionalitäten getestet werden. Erst dann kann die Maschine in Produktion gehen. Für die Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Maschinen gibt es verschiedene an „Plug and Play“-Mechanismen aus Rechnersystemen angelehnte Verfahren [14], [15] oder Verfahren, die auf im Voraus erstellte

Softwarekonfigurationen zurückgreifen [16], [17]. Allerdings existiert bisher noch keine Unterstützung für die Inbetriebnahme von Modulen verschiedener Hersteller, die ohne zuvor erstellte Software-Konfigurationen im Steuerungssystem zurechtkommen.

4.2 *Schwerpunkte der Verbundprojektpartner*

KOMET Group GmbH

- Konstruktion und Auslegung eines Drehübertragers zur berührungslosen Daten- und Energieübertragung
- Entwicklung von Prototyp-Aussteuerwerkzeugen für die standardisierten Schnittstellen.

MAPAL Dr. Kress KG

- Entwicklung einer universellen und standardisierten Schnittstelle für CPMs.
- Prototypische Entwicklung flexiblerer Systeme (CPM) mit normierten Schnittstellen.

Blum-Novotest GmbH

- Ersetzen der autarken Energieversorgung mittels Batterien von einwechselbaren Messsystemen durch eine universelle kontaktierende Energieversorgung.
- Substitution der aufwändigen drahtlosen Datenkommunikation zwischen Messgerät und Werkzeugmaschinensteuerung durch eine direkte Schnittstelle.

Renishaw GmbH

- Gemeinschaftliche Entwicklung einer Standardschnittstelle zur Energie-, Stoff-, und Datenübertragung für CPS unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen von Systemen zur Werkstück- oder Maschinengeometriemessung.
- Erzielen von Verbesserungen für Anwender wie höhere Datenraten, einfachere Systeminstallation, Inbetriebnahme und Anwendung sowie die Vermeidung von Batterien.
- Aufbau von Prototypen zur Validierung der Schnittstelle für den Einsatz zur Erfassung geometrischer Größen.

SW - Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH

- Einbau und Test der neuen standardisierten Schnittstelle für CPS in eine Versuchsmaschine.

Franz Kessler GmbH

- Entwicklung der Motorspindel als Datenschnittstelle zwischen Werkzeug und Steuerung.
- Besondere Betrachtung der mechanischen Gestaltung der BaZMod-Schnittstelle bei Integration dieser in heutige standardisierte Werkzeugschnittstellen.

Hainbuch GmbH

- Schaffung eines Schnittstellenstandards für CPM im Bereich der spanenden Bearbeitung unter Konformität mit geltenden Richtlinien.

Röhm GmbH

- Entwicklung eines Schnittstellenstandards für die Energie- und Datenübertragung unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des kompletten Spannsystems.

- Daraus abgeleitete Verknüpfungen zwischen den Einzelkomponenten zu schaffen.

Trigerion UG

- Entwicklung eines robusten und leistungsfähigen Energie- und Datenübertragungssystems, das die bidirektionale Übertragung von Daten in Echtzeit für die Anbindung von diversen Sensor- und Werkzeugsystemen im Umfeld von Werkzeugmaschinen erlaubt.

ISW

- Definition einer Softwarearchitektur für die CPM zur Datenverarbeitung und Kommunikationsanbindung.
- Schaffung einer einheitlichen Schnittstelle für CPM zur NC unterschiedlicher Hersteller.

IfW

- Optimale konstruktive (Mit-)Gestaltung der mechanischen Teile des neuartigen Systems, vornehmlich Einkopplungssysteme, Drehübertrager, Spindelwelle und bisherige Standardschnittstelle.
- Betriebssichere, störungssichere Integration der gewünschten cyber-physischen Funktionalitäten ohne Einbußen in der mechanischen, statisch-dynamischen und thermischen Robustheit und Qualität gegenüber dem bisherigen Standard.

iwb

- Aufbau eines modularen Baukastens eines Adapterflansches zur Nachrüstung bestehender Werkzeugaufnahmen an Spindeln.
- Prototypische Inbetriebnahme der Schnittstelle und Entwicklung neuartiger CPS zur Prozessregelung unter Nutzung der normierten Schnittstellen.

IGCV

- Aufbau cyberphysisches Zusatzmodul für Fräsprozesse
- Aufbau Regelungssystem zur Kompensation von Verformungen
- Konzeptionierung zur Anbindung Regelungssystem an BaZMod-Schnittstelle

5 Ergebnisse

Die Darstellung der erzielten Ergebnisse wird an den im Abbildung 8 dargestellten Plan gegliedert.

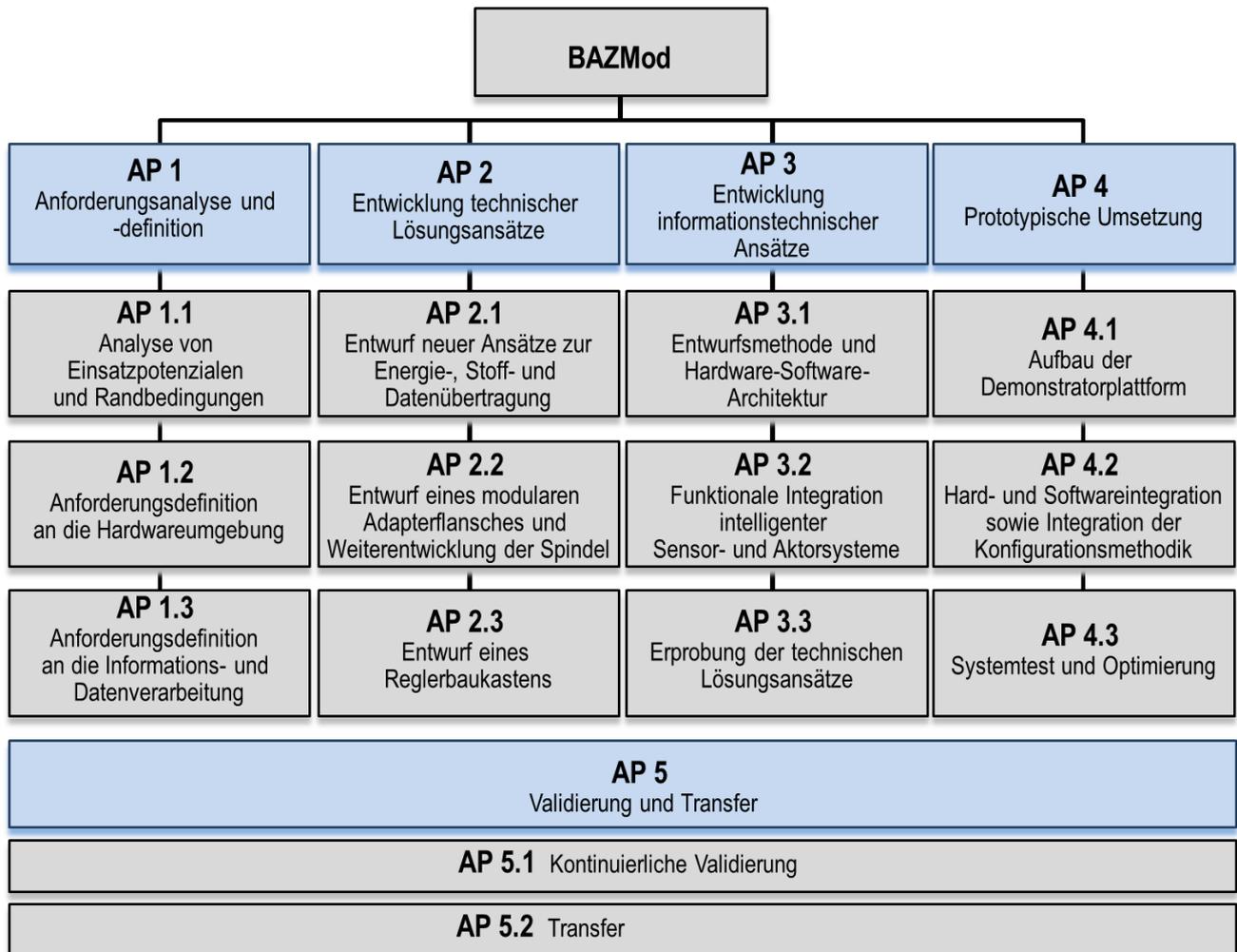


Abbildung 8: Arbeitspakete des Forschungsprojektes BaZMod

5.1 AP 1: Anforderungsanalyse und -definition

AP 1.1: Analyse von Einsatzpotentialen und Randbedingungen

In diesem AP wurden die Anwendungsgebiete von Cyber-Physischen Systemen (CPS) sowie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Einbindung von Cyber-Physischen Modulen (CPM) und deren Funktionen in Werkzeugmaschinen ermittelt. Nach der Analyse der Einsatzpotentiale und der Randbedingungen wurde von den Projektteilnehmern eine Reihe verschiedener Anwendungsfälle gesammelt, welche die Grundlage für die nachfolgende Definition der Hardware- und Softwareumgebung bilden. Beispiele für Anwendungsfälle sind unter anderem

- Intelligente Messmittel,
- Durchgehend überwachte Spannmittel,
- Aktive Werkzeuge
- Werkzeugangepasste Maschinenparametrierung
- Verformungskompensation für dünnwandige Werkzeuge.

Die gesammelten Anwendungen beinhalteten sowohl solche, welche bereits mit anderen Schnittstellen realisiert wurden, als auch vollständig neuartige Anwendungen.

Die gesammelten Anwendungen wurden auf Relevanz und Realisierbarkeit untersucht und anschließend gruppiert. Aus diesem Ergebnis wurden die allgemeinen Anforderungen an die BaZMod-Schnittstelle bezüglich Medienversorgung, Energieversorgung und Kommunikationseigenschaften abgeleitet und festgehalten.

AP 1.2: Anforderungsdefinition an die Hardwareumgebung

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 1.2 wurden die technischen Anforderungen an die mechanische Gestaltung der HSK-Schnittstelle und der Spindel, sowie die Anforderungsdefinition der Hardwareumgebung konkretisiert und im Pflichtenheft dokumentiert.

Grenzen aus Sicht der Motorspindel

Die zuverlässige Übertragung von Daten, Energie und Medien von der jeweiligen Werkzeugmaschine über die Anschlüsse an der Rückseite der Motorspindel bis zur Cyberphysischen Vorsatzkomponente an der Spindelvorderseite erfordert eine jeweilige Infrastruktur um die Signale und die Energie durch die Motorspindel in die CPS zu leiten.

Während geometrische Anpassungen an den statischen Komponenten der Motorspindel größtenteils unkritisch vollzogen werden können, so ist das Übertragen von Signalen und Energie vom statischen in den rotierenden Teil der Motorspindel eine anspruchsvolle Aufgabenstellung.

Hieraus ergeben sich die Herausforderungen und Systemgrenzen im Bereich der Motorspindel. Einerseits sind das die fliehkraftbelasteten, rotierenden Bauteile wie etwa die Übertragungseinheit, die HSK-Schnittstelle an der vorderen Seite der Motorspindel und die Lagerung derselben. Andererseits müssen die dynamischen Eigenschaften der Motorspindel, wie etwa Nachgiebigkeitsfrequenzgang, thermisches Verhalten und Beschleunigungsverhalten auf maximale Drehzahl, berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu den begrenzenden Eigenschaften der eigentlichen Motorspindel, ergeben sich Grenzen, die aus den Bedingungen innerhalb der Motorspindel resultieren. Hier sind insbesondere die Faktoren EMV, Schmierung der Lagerung, Schwingung, Magnetismus und thermische Belastung der Umgebungsbauteile zu nennen.

Aus diesen Grenzen der Motorspindel ergeben sich komponentenbezogene Eigenschaften, die im weiteren Verlauf detailliert untersucht und qualifiziert werden:

- Nachgiebigkeitsfrequenzgang
- Drehzahlfestigkeit des Drehübertragers
- Steifigkeiten der Motorspindel
- Modalanalysen in Bezug auf die Eigenformen der Motorspindelwelle
- Bauraumbetrachtungen innerhalb der Motorspindel
- Serientauglichkeit der Lösungsansätze im Bearbeitungsraum der Werkzeugmaschine
- Montage- und Servicetauglichkeit

Einige Beispiele:

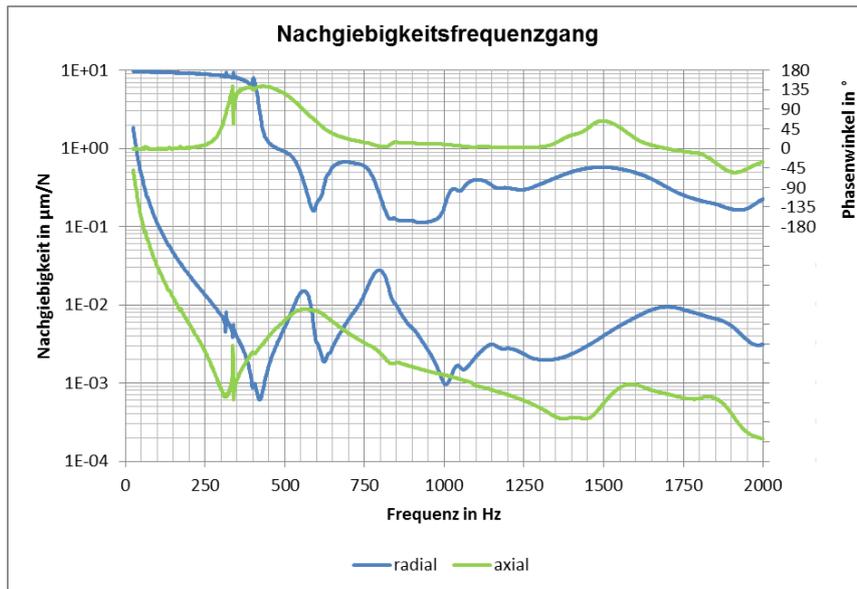


Abbildung 9: Beispielhaftes dynamisches Verhalten einer Motorspindel

Insbesondere sind hier die Lagerungsgestaltung und die Bohrungen in der Welle zur Kabelverlegung einflussgebend. Bei der Integration der notwendigen Infrastruktur zum Betrieb der CPS in die Motorspindel ist eine weitestgehend identische dynamische Welleneigenschaft im Vergleich zu bestehenden Spindellösungen gefordert.

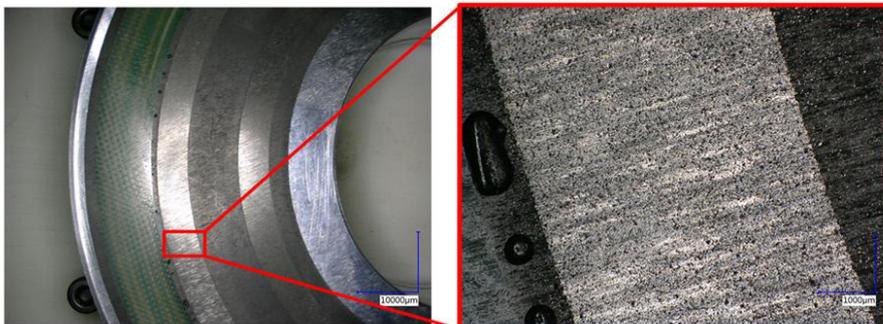


Abbildung 10: Getesteter Rotor des Drehübertragers (n max = 18 000 rpm)

Rotorgetragene Elemente der Übertragereinheit müssen in allen Belangen die entsprechende Fliehkräftfestigkeit aufweisen. Insbesondere sind hier die Ferritkerne zu untersuchen.

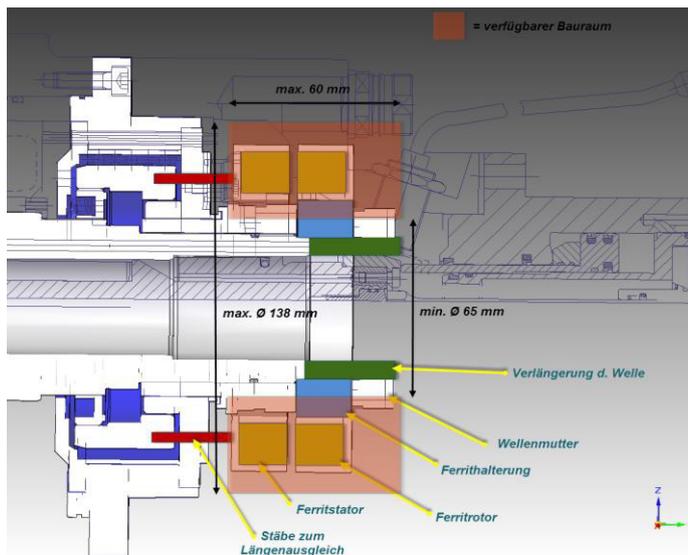


Abbildung 11: Bauraumbetrachtung der Motorspindel (Loslagerseite)

Untersuchungen der Bauteile in der Spindel ergeben den zur Verfügung stehenden Bauraum. Dieser ist durch maschinenseitige Umgebungsbauteile, sowie dynamische Effekte und flieh-kraftbedingte Grenzen eingeschränkt.

Schlussendlich ist eine Integration von 8 elektrischen Leitungen in die Spindelwelle erreicht worden. An den jeweiligen vorderen und hinteren Planflächen sind Steckverbinder eingebracht, um die sichere Kontaktierung der elektrischen Leitungen zu gewährleisten.

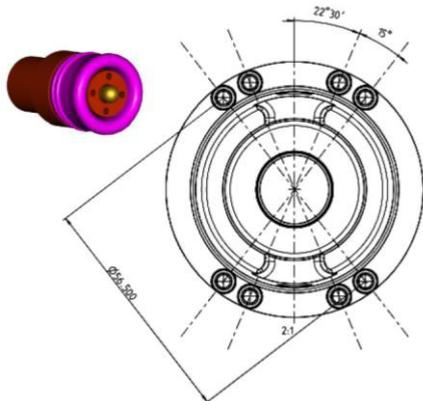


Abbildung 12: Erste Skizze – mögliche Positionen der Steckkontakte auf der HSK-Schnittstelle

Die Spannsituation soll sich gegenüber einer Standardspindel nicht ändern. Es sollen in einer BaZMod-Spindel Standard-HSK-Werkzeuge eingewechselt und gespannt werden können. Die Planfläche soll durch Kontakte oder Schnittstellen keine zusätzlichen Störkonturen erhalten. Ebenso soll es bei den Anforderungen bezüglich Lebensdauer (Werkzeugwechselintervalle) keine Einbußen geben.

AP 1.3: Anforderungsdefinition an die Informations- und Datenverarbeitung

In AP 1.3 wurde geklärt welche Informationen zwischen der Maschine und dem CPS-Modul ausgetauscht werden können beziehungsweise müssen. Das IfW hat sich vor allem an die Klärung der zur Verfügung zu stellenden Kanäle und Übertragungswege in der Schnittstelle beteiligt. Hierfür wurde in Anlehnung der Anforderungen dieses AP eine Abfrage zur Medienverfügbarkeit durchgeführt. Ziel war es die Klärung welche Medien (Kühlschmierstoff, Druckluft, Vakuum, Hydrauliköl und Reinigungsluft) zeitgleich von der Maschine durch die HSK-

Schnittstelle dem CPS zur Verfügung gestellt werden müssen. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass nur zwei Projektpartner (SW und IfW) sich je einen möglichen Anwendungsfall vorstellen, der gleichzeitig Druckluft und Hydrauliköl benötigt. Da der Anwendungsfall von SW nicht für die Hauptspindel der Maschine sondern eventuell für die Werkstückspannung auf der 5. Achse in Frage kommt und der Anwendungsfall von IfW (Nibbeln) im Vergleich zu den konventionellen Werkzeugen schätzungsweise einen vernachlässigbar geringen Marktanteil darstellt, wurde beschlossen die Durchführung von Hydrauliköl nur in Form einer Platzreservierung auf der Plananlagefläche des HSK zu berücksichtigen.

Um die zu entwickelnde Schnittstelle zukunftsfähig zu gestalten wurde für die zu erreichende Datenrate nicht anhand von in den ausgewählten Anwendungen benötigten Datenrate bestimmt, sondern deutlich höher gewählt, so dass eine Übertragung eines Videosignals möglich wäre.

In Bezug auf die Informations- und Datenverarbeitung gelten die weiter oben beschriebenen Einflussfaktoren der Motorspindel auf den Datentransfer durch Temperatur, Magnetismus und EMV im Bereich der Spindelwelle. Auch die mechanische Beanspruchung der Leitungen und Steckkontakte durch Fliehkraft in Wärme müssen mit weiteren Tests genau untersucht werden.

Für die Messmittelhersteller BLUM und Renishaw ist es wichtig, ohne Umwege (Signalverzögerungen) vom Drehübertrager auf den schnellen Messeingang der NC-Steuerung zu kommen. Auch für CPS, die nicht über einen Industrial-Ethernet-Bus ankoppeln können, ist es wichtig, sich mit eigenen Interfaces an die RS-422-Schnittstelle des Drehübertragers verbinden zu können. Weiterhin wurden gemeinsam mit dem ISW digitale Steuerungsanbindungsmöglichkeiten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass CPS mit Servoantrieben, die im Interpolationsverbund der verwendeten Siemens-NC betrieben werden sollen, nicht über Feldbusse oder Industrial Ethernet angekoppelt werden können.

5.2 AP 2: Entwicklung technischer Lösungsansätze

AP 2.1: Entwurf neuer Ansätze zur Energie-, Stoff- und Datenübertragung

In AP 2.1 wurden Konzepte zur Energie- und Datenübertragung mittels eines berührungslosen Drehübertragers in der Spindel, sowie der kontaktierenden Übertragung am Werkzeug untersucht und abgestimmt.

Für die Übertragung von Energie und Daten an den rotierenden Teil der Spindel wurden verschiedene existierende Methoden betrachtet. Für die Energieübertragung bestehen prinzipiell die Möglichkeiten

- Induktive Übertragung
- Kapazitive Übertragung
- Elektromagnetisch
- Strahlung (z.B. Laser oder Mikrowellen)
- Berührend über Schleifringe

Für die betrachteten Leistungs- und Drehzahlbereiche kommt als erprobtes Verfahren letztendlich nur die induktive Übertragung in Frage.

Der Drehübertrager besteht im Prinzip aus zwei Vollringen mit einer Hohlwellenbohrung zur Aufnahme an der Maschinenspindel-B-Seite. Ein Ring (Rotor) ist mit dem Spindelrotor verbunden und rotiert mit der Spindel. Der andere Ring (Stator) wird am Spindelgehäuse befestigt.

Forschungsbericht

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

Die etwas umfangreichere Statorelektronik für die Energieübertragung ist in ein eigenes Gehäuse (Modulator) ausgelagert. Für die CPS werden 600 W bei 48 V bzw. 30 W bei 5 V zur Verfügung gestellt. Die Spannungen können zu- und abgeschaltet werden. Die Datenrate beträgt 10Mbit/s bidirektional. Um eine hohe Störsicherheit zu erreichen, werden die Daten mit Vierdraht-Technik differentiell übertragen (RS-422). Umfangreichere experimentelle und simulative Untersuchungen zur Drehzahlfestigkeit der Ferrite im Energieübertrager wurden durchgeführt (Abbildung 13).

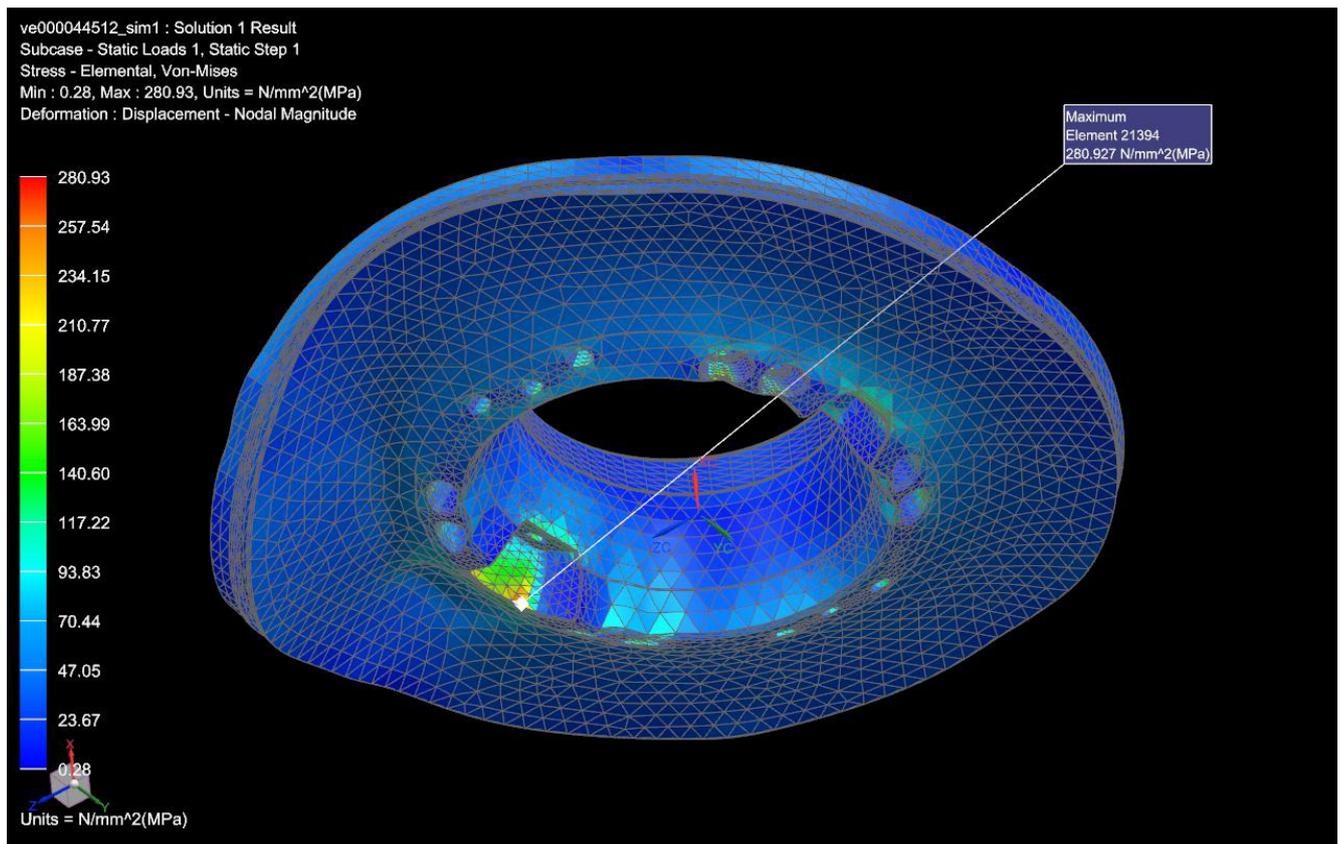


Abbildung 13: FEM-Untersuchung

Die Integration des Drehübertrager-Rotors war relativ aufwendig, weil am B-Spindelende die komplette Medienversorgung der Spindel angedockt ist und auch der Werkzeugspanner durchgeführt wird. Somit sind die Raumverhältnisse sehr beengt, was auch spezielle Anforderungen an die Lösungsfindung für die Montierbarkeit stellte.

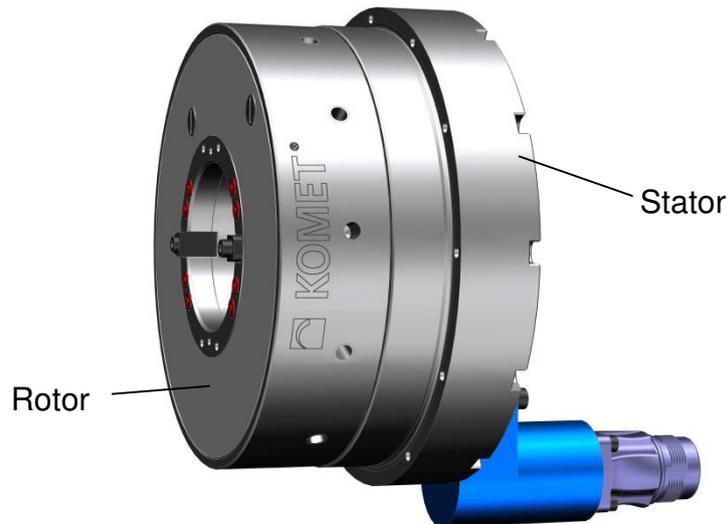


Abbildung 14: BaZMod-Drehübertrager

In enger Zusammenarbeit mit der Firma Kessler und weiteren Projektpartnern wurden die elektrischen und mechanischen Schnittstellen zum Drehübertrager an der Spindel-B-Seite ausgelegt. Die Energie- und Datenleitungen wurden entsprechend der Winkelteilung der Kontakte an der Spindel-A-Seite (HSK-i-Schnittstelle) angeordnet, um eine einfach zu fügende Kontaktschnittstelle zwischen Spindelrotor und Drehübertragerrotor zu realisieren.

Eine weitere konstruktive Herausforderung war die Sicherstellung des konstanten Abstandes von $0,2^{+0,1}$ mm zwischen Rotor und Stator während des Betriebs, unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung der Spindel.

Damit die Belastungen der Spindellagerung bei hoher Drehzahl die zulässigen Werte nicht übersteigen, muss der Rotor axial äußerst kompakt bauen. Dies hat eine komplexe Konstruktion des Rotors, bei der Integration der Elektronik und deren Kontaktierung zur Folge.

Ebenso muss die Elektronik auch für höchste Drehzahlen bis 17.500 min^{-1} drehzahlfest in den Rotor integriert werden. Dies erforderte einen großen Entwicklungsaufwand sowohl bei KOMET als auch dem Entwicklungspartner Trigerion.

Für die Übertragung der Daten stehen deutlich mehr Verfahren zur Verfügung, wobei jene Verfahren, welche bereits fortgeschrittene Protokolle umsetzen zumeist an den Anforderungen kurzer Zykluszeiten, kurzer Antwortzeiten und insbesondere konstanter Verzögerung scheitern. Optische Verfahren scheiden aufgrund der wahrscheinlichen Funktionsstörung durch Kühl-Schmiermittel oder Späne aus. Letzten Endes erfolgt die Übertragung der Daten, wie die Übertragung von Energie, über eine induktive Kommunikationsstrecke.

Aus Überlegungen zu Bauraumeinflüssen und Verschmutzung erfolgt die Anbringung des Übertragers für Energie und Daten auf der Rückseite der Spindel, welche der Bearbeitungsseite abgewandt ist.

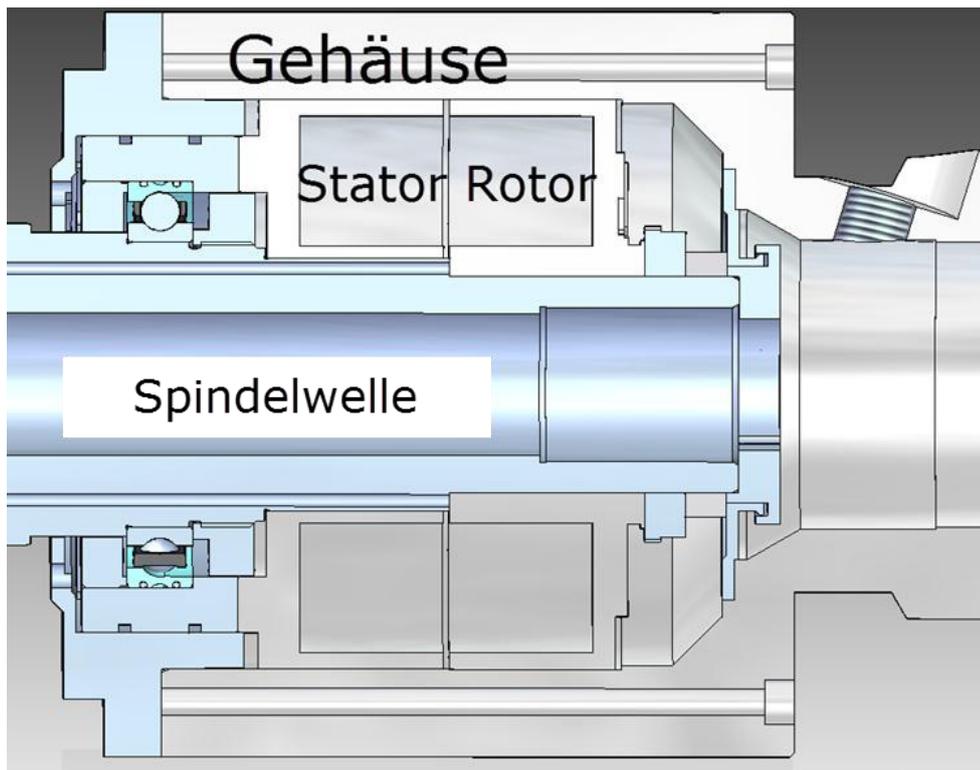


Abbildung 15: Erste 3D Skizzen zur Übertrageranordnung

Neben der Positionierung des Drehübertrages wurde maßgeblich die Kabelführung und die Kontaktierung der einzelnen Daten- und Energieleitungen mit den Anschlusspositionen am Datenübertrager und an der HSK Schnittstelle betrachtet. Die einzelnen Positionen sind gemäß Abbildung 16 bestimmt und festgelegt.

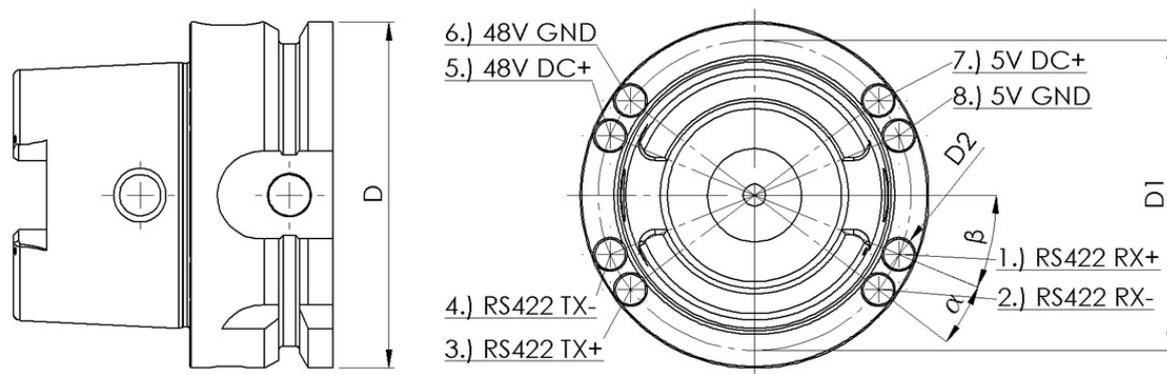


Abbildung 16: Endgültige Festlegung der Positionen und Funktionen der Daten- und Energiekontakte am HSK-Werkzeug

Parallel zu diesen Untersuchungen sind erste Prüfstandversuche in Bezug auf die Bauteilfestigkeiten der jeweiligen Übertragereinheiten durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Versuche bestätigen die erweiterten Festigkeitsberechnungen der einzelnen Bauteile. In der getesteten Version ist eine ausreichende Festigkeit der Bauteile erzielt worden. Wichtige Arbeiten, um diese Festigkeiten zu erreichen, waren das Bandagieren der verwendeten Ferrite sowie das Vergießen mit Harz, zusammen mit den verwendeten Platinen. Diese Arbeiten wurden von Hainbuch ausgeführt.



Abbildung 17: Röhre Spansystem Super Lock

Beim Spansystem wurde eine Lösung auf Basis des federlosen Spansystem „Super Lock“, dargestellt in Abbildung 17, generiert. Durch die selbstverriegelnde Einheit ist dieses Spansystem ohne Feder zu betreiben. Es werden dadurch mehrere Vorteile ermöglicht, die auch in die BaZMod Spindel mit einfließen konnten. Da dieses System keine Federn besitzt, kann viel einfacher und teilweise fast ohne Wuchten ein Spansystem aufgebaut werden. Durch den kleineren Bauraum und den Verzicht auf das Federsystem können höhere Drehzahlen angefahren werden. Ebenso kann durch den kleineren Bauraum anderes in der Spindel zum Einsatz kommen (z.B. Tieflochbohrungen für die Leitungsdurchführung in der Spindel).

Um die Erweiterbarkeit der neuen Schnittstelle hinsichtlich der Medien-, Daten- und Energieübertragung zu untersuchen wurden mehrere CAD-Modelle und darauf aufbauend FE-Modelle aufgebaut und validiert. Abbildung 18 stellt das Gesamt CAD-Modell der Spindel dar. Da nicht alle realen Umstände mit einem vertretbaren Aufwand abgebildet werden können, müssen Vereinfachungen getroffen werden, um das System sinnvoll und ausreichend korrekt zu beschreiben.

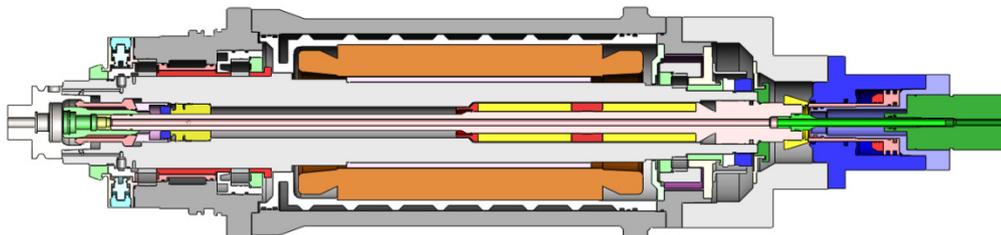


Abbildung 18: Gesamtmodell der Spindel

Abbildung 19 links stellt ein Teilmodell der Spindelnase dar, bei dem eine Schnellkupplung der Fa. Stäubli vom Typ SPC zur Medienübertragung in der HSK-Schnittstelle integriert wurde. Die Anforderungen zum beidseitigen Verschluss, kein Lufteintritt beim Umstecken und zuverlässige Funktion wurden laut Hersteller bis zu einem Druck von 450 bar und einer Temperatur von 150°C gewährleistet. Um die statischen und dynamischen Eigenschaften der modernisierten Schnittstelle sicherzustellen wurden umfangreiche simulative Untersuchungen vorgenommen. Abbildung 19 rechts zeigt exemplarisch die Schwächung der HSK-Plananlagefläche anhand der statischen Steifigkeit. Mit einer Reduzierung der statischen Steifigkeit von 7% bei 4 kN Last ist beim künftigen CPS-Modul mit Einbußen bei der ein- oder anderen Funktion bei Vollast zu rechnen. Die Medienübertragungs-Schnittstelle wäre auch nur bei größeren Bau-Größen (ab 80-B) des HSK möglich.

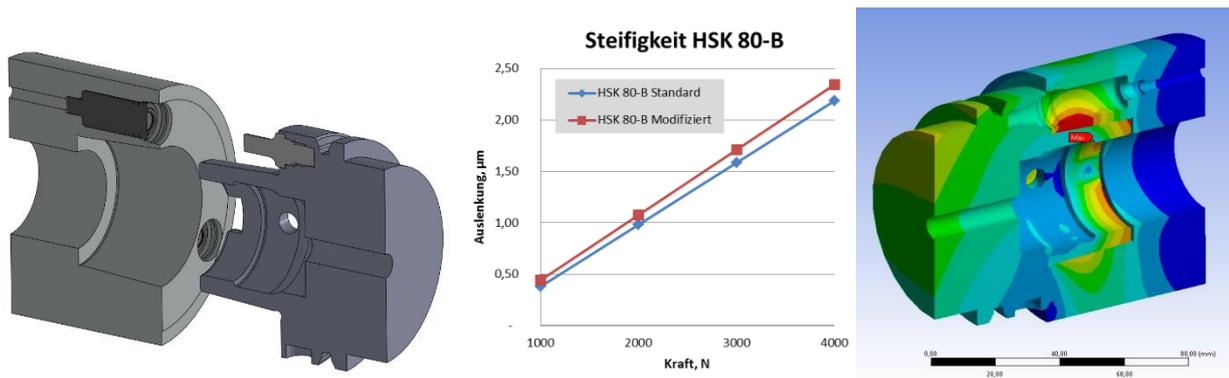


Abbildung 19: Modell der Spindelnase mit Mediendurchführung

Für die zu untersuchende Spindel wird das gesamte CAD-Modell weiter angepasst, sodass die relevanten Eigenschaften, wie Masse, Massenverteilung und Steifigkeit so genau wie möglich die reale Spindel abbilden. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden dabei Details, wie Nuten und Bohrungen für Plananlagekontrolle und die Sperrluft vernachlässigt, um den zeitlichen Aufwand der Simulationen für die Modellvalidierung einzugrenzen. Um ihren Einfluss auf die Systemeigenschaften zu untersuchen, werden diese später wieder hinzugefügt. Das reduzierte Modell der Spindel ist in Abbildung 20 dargestellt.

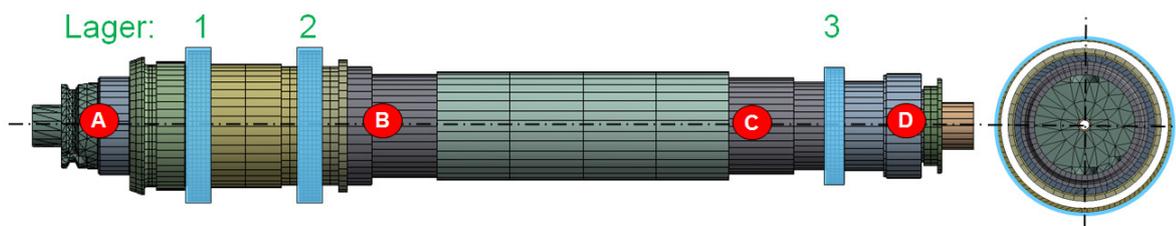


Abbildung 20: Vereinfachtes FE-Modell der Spindel

Voraussetzung für weitere simulative Untersuchungen ist die Validierung des aufgebauten FE-Modells. Diese wurde anhand von experimentell ermittelten Frequenzgängen durchgeführt. Die Messungen wurden von der Firma Kessler zur Verfügung gestellt. Der Validierungsprozess erfolgte in zwei Schritten – statisch und dynamisch. Um das Modell statisch zu validieren, wird das FE-Modell wie bei der Durchführung des Experiments an der Vorderseite des HSK mit axialen und radialen Kräften belastet und die Verlagerung am gleichen Punkt ermittelt. In Abbildung 21 links ist der Angriffspunkt der Kräfte und der Messpunkt der Verlagerung am Spindelmodell abgebildet. Die Messwerte der statischen Verlagerung der Spindel in radialer und axialer Richtung, sowie die simulativ bestimmten Verlagerungen des validierten Modells sind in Abbildung 21 rechts abgebildet.

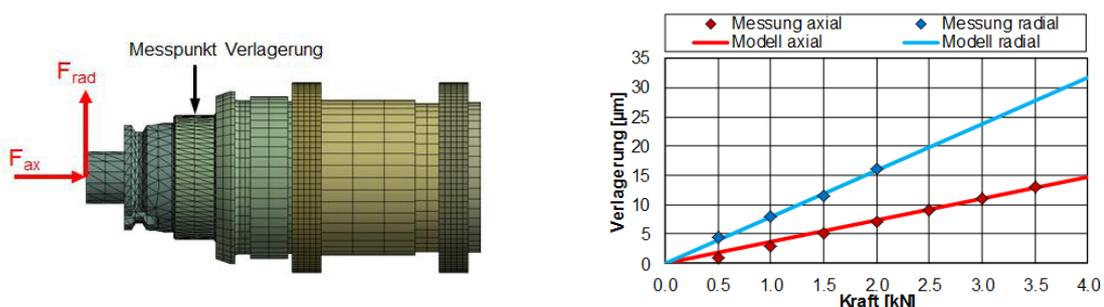


Abbildung 21: Statische Modellvalidierung

Weiterhin wurde das FE-Modell im Frequenzbereich, also dynamisch, validiert. Für diesen Zweck müssten zunächst die Eigenformen identifiziert (Mode Tracking) und ihrer Eigenfrequenzen entsprechend zugeordnet werden. Die Validierung wurde teilautomatisch mittels eines Optimierungsproblems, bei dem eine Zielfunktion minimiert wurde, gelöst. Als Zielfunktion F wurde dazu der euklidische Abstand der simulativ und experimentell bestimmten Eigenfrequenzen der Biegemode i definiert. In Gleichung 5.1 ist dieser Abstand als Summe der Quadrate der Differenz zwischen von n simulierten Eigenfrequenzen f_{Bi} und gemessenen Eigenfrequenzen $f_{Bi,exp}$ dargestellt.

$$F = \sum_{i=1}^n (f_{Bi} - f_{Bi,exp})^2 \tag{5.1}$$

Abbildung 22 zeigt den Vergleich zwischen den experimentell ermittelten und den simulativ berechneten Frequenzgängen der Spindel jeweils in axialer und radialer Richtung. Man sieht eine sehr gute Übereinstimmung im unteren bis mittleren und eine gute im oberen Frequenzbereich. Mit dem validierten FE-Modell der Spindel kann nun die Auswirkung der neu zu entwickelnden Übertragungskonzepte auf das statische und dynamische Systemverhalten simulativ untersucht werden.

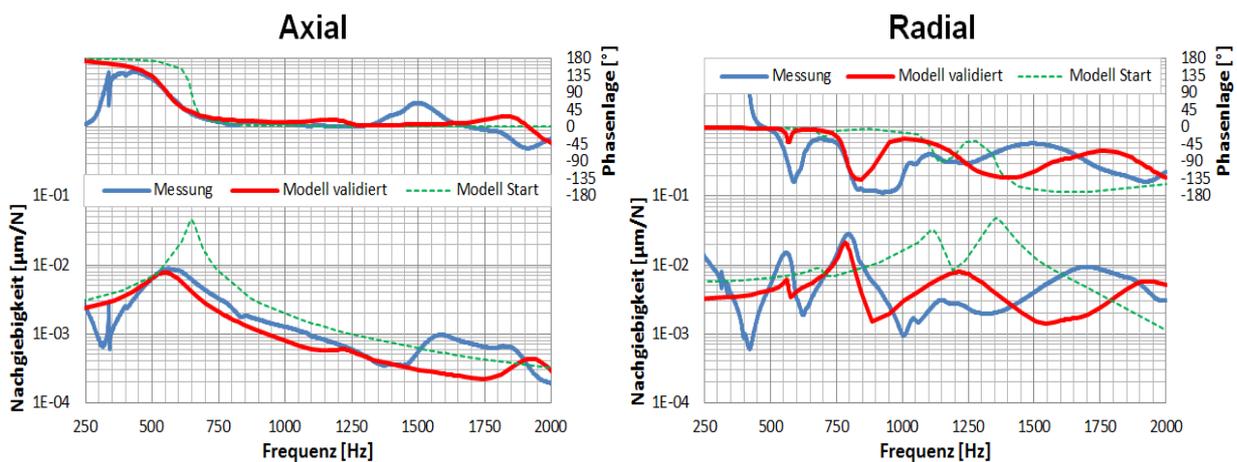


Abbildung 22: Gegenüberstellung von Messung und Rechnung als Ergebnis der dynamischen Validierung

AP 2.2: Entwurf eines modularen Adapterflansches und Weiterentwicklung der Spindel

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 2.2 wurden Übertragungskonzepte zur Durchführung von Energie, Medien und Daten durch die Spindelwelle entwickelt. Diese sind in Abbildung 23 dargestellt.

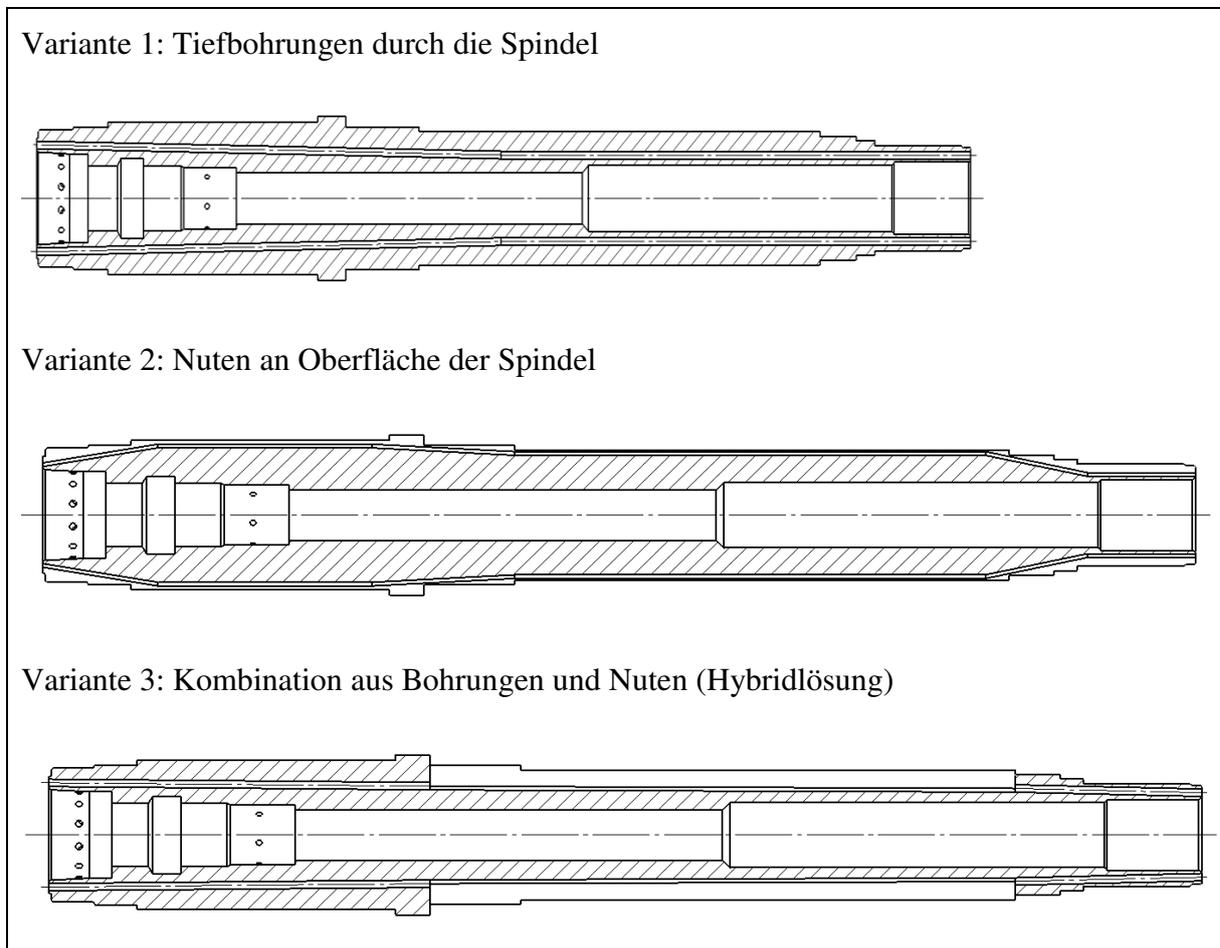


Abbildung 23: Konzepte für Durchführungen in der Spindelwelle

Beim ersten Konzept werden sechs Tiefbohrungen von beiden Seiten der Spindel eingebracht, welche sich in der Mitte der Spindel treffen. Durch diese Bohrungen können sowohl Daten- und Energieleitungen, aber auch Medien auf die Arbeitsseite der Spindel übertragen werden.

In der zweiten Variante werden Nuten in die Oberfläche der Welle gefräst, in die Leitungsrohre eingelegt werden können. Diese Variante kann fertigungstechnisch relativ einfach realisiert werden. Da die Nuten jedoch auch unter den Spindellagern verlaufen, muss der Einfluss auf die Spindellager noch untersucht werden.

Die dritte Variante kombiniert die beiden zuvor vorgestellten Varianten und wird hier Hybridlösung genannt. Hier werden durch Tiefbohrungen unter den Lagersitzen die Lagerstellen weniger beeinflusst. Um die Tiefbohrungen zu verkürzen enden diese im Mittelteil der Welle in Nuten.

Die hier vorgestellten Konzepte müssen in einem weiteren Schritt einer Detailkonstruktion unterzogen werden, in denen die Systemeigenschaften optimiert werden können. Als geeignete Stellschraube zur Optimierung der Systemeigenschaften, kann bei den Bohrungen die Position und Verlauf in z-Richtung, sowie der Bohrungsdurchmesser dienen. Für die Nuten kann die Nutbreite, -tiefe und -form angepasst werden. Diese Parameter werden jedoch durch weitere

Randbedingungen, wie z.B. des nötigen Kabelquerschnitts zur Übertragung von elektrischer Energie, eingeschränkt.

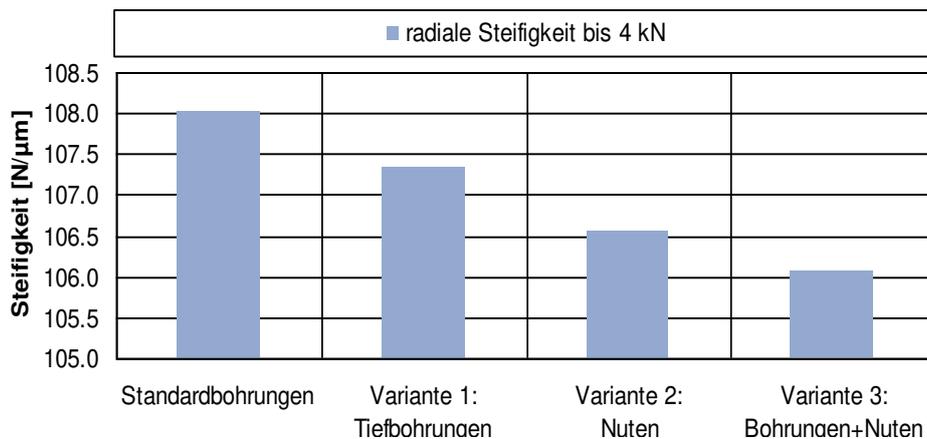


Abbildung 24: Gegenüberstellung der radialen Steifigkeiten der Konzepte

Durch die zusätzlichen Durchführungen wird der Querschnitt der Spindel, gerade auf der Arbeitsseite der Spindel geschwächt. Dort werden die Bearbeitungskräfte vom Werkzeug auf die Spindel übertragen und dort von der Lagerung aufgenommen. Die hohen Steifigkeitsanforderungen an Werkzeugmaschinen-spindeln erfordern, dass die Schwächung des Spindelquerschnitts nur eine möglichst geringe Steifigkeitsreduzierung nach sich zieht. Deshalb wird im Folgenden der Einfluss der Durchführungen auf die statische Steifigkeit der Spindel untersucht.

Zur Beurteilung des Einflusses der Übertragungskonzepte wird deren Einfluss auf die radiale und axiale Spindelsteifigkeit untersucht. Dazu werden die Verlagerungen der Spindel entsprechend Abbildung 21 bei Belastungen in axialer und radialer Richtung simuliert. Bei einer Belastung bis 4 kN verlagert sich die Spindel bei allen Konzepten linear zur Kraft, weshalb hierfür konstante Werte für die Steifigkeit des Systems bestimmt werden. In Abbildung 24 Abbildung 25 sind diese einander gegenübergestellt.

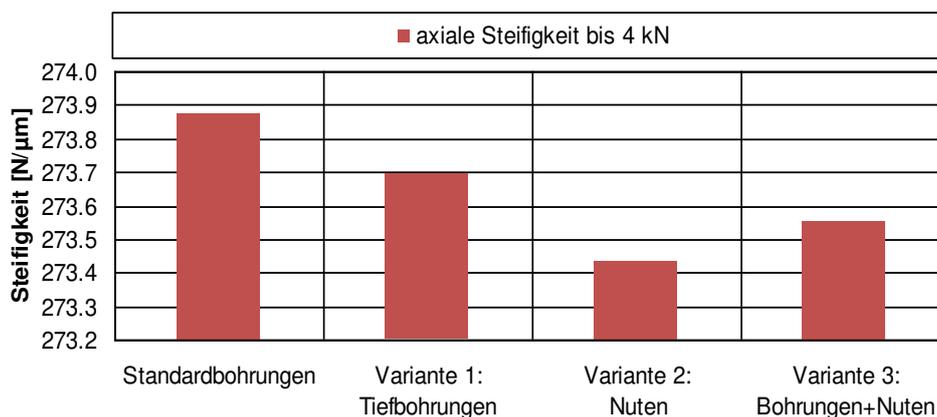


Abbildung 25: Gegenüberstellung der axialen Steifigkeiten der Konzepte

Die radiale Steifigkeit reduziert sich bei allen drei Konzepten, da der Querschnitt und damit das Flächenträgheitsmoment der Spindel durch die zusätzlichen Nuten und Bohrungen geschwächt werden. Die Tiefbohrungen nach Variante 1 reduzieren dabei die Steifigkeit geringer als die beiden anderen Varianten.

Variante 1 und 3 unterscheiden sich hinsichtlich der axialen Steifigkeit weniger voneinander als bei der radialen Steifigkeit. Grund hierfür ist, dass die axialen Kräfte größtenteils vom ersten

Spindellager aufgenommen werden, sodass der Spindelquerschnitt zwischen Lager 2 und 3 kaum einen Einfluss auf die axiale Steifigkeit der Spindel besitzt.

Die größte Reduktion der axialen Steifigkeit tritt bei Übertragungskonzept 2 auf. Hier wird durch die Nuten ein größerer Anteil an Material aus dem arbeitsseitigen Bereich der Spindel entfernt, sodass die Stützwirkung reduziert wird.

Weiterhin wurde der Einfluss der Übertragungskonzepte auf die dynamischen Eigenschaften des Gesamtsystems untersucht. In Abbildung 26 sind die Änderungen der Eigenfrequenzen der jeweiligen Übertragungskonzepte dem validierten Modell gegenübergestellt.

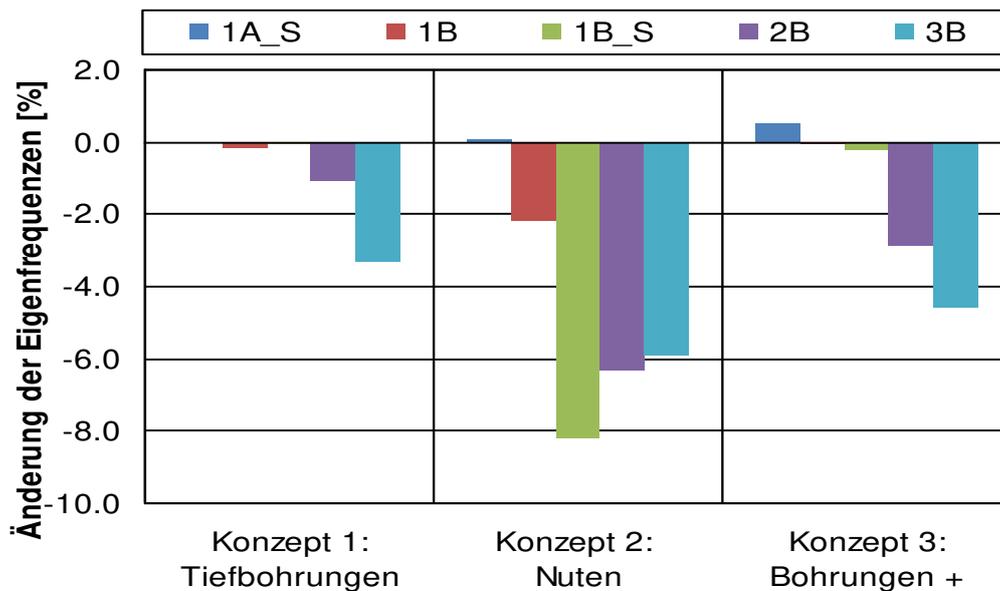


Abbildung 26: Einfluss der Übertragungskonzepte auf dynamische Eigenschaften

Bei Konzept 1 verringern sich die Moden der Eigenfrequenzen 1AS, 1B und 1BS kaum. Lediglich die Frequenzen der Moden 2B und 3B verringern sich in einer Größenordnung von 1% bzw. 3%. Konzept 2 führt hingegen zu einer stärkeren Änderung die Eigenfrequenzen des Spindel systems. Besonders die Frequenzen der Biegemoden werden durch Konzept 2 stark beeinflusst. Die hier simulierten Frequenzen weichen um 2% bis 8% von denen des validierten Modells ab. Lediglich die erste longitudinale Starrkörpermode 1AS wird durch das Konzept kaum beeinflusst. Bei Konzept 3 ist ein ähnliches Verhalten wie bei Konzept 1 festzustellen. Auch hier werden die Biegemoden 2B und 3B am stärksten beeinflusst.

Nach der Entscheidung des Konsortiums für das erste Konzept (Tieflochbohrungen) wurden die rechnergestützten Untersuchungen des dynamischen Spindelverhaltens fortgeführt. Von besonderem Interesse war dabei der Einfluss der Bohrungen in der Spindelwelle auf die dynamische Steifigkeit der Spindel. Diese konnte durch Simulation des Nachgiebigkeitsfrequenzgangs der Spindel bestimmt werden. Drei Varianten wurden untersucht: die Standardwelle ohne Bohrungen, die Spindelwelle mit sechs Bohrungen und die Spindelwelle mit acht Bohrungen.

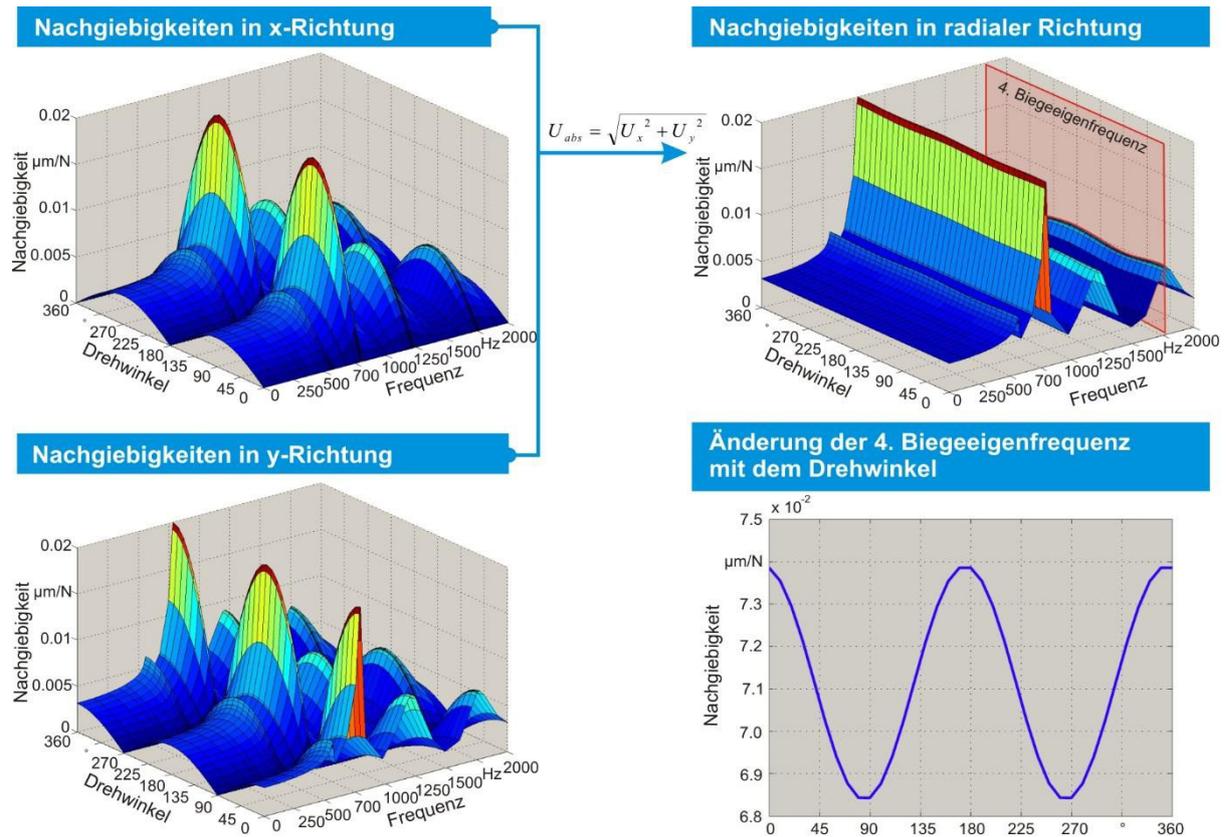


Abbildung 27: Frequenzabhängige Nachgiebigkeits-3D-Plots in Abhängigkeit des Drehwinkels für die Variante mit sechs Bohrungen

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Übertragungsbohrungen in Spindel und Werkzeugaufnahme ist dabei ein richtungsabhängiges Nachgiebigkeitsverhalten zu erwarten. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde in das Modell eine schrittweise umlaufende Kraft am Werkzeug implementiert. Hierdurch kann der Nachgiebigkeitsfrequenzgang in jeder Winkelstellung der Spindel bestimmt werden. In Abbildung 27 sind die auf diese Weise generierten Nachgiebigkeitsfrequenzgänge für eine um 360° umlaufende anregende Kraft in den radialen Richtungen x und y sowie absolut für die Variante mit sechs Bohrungen dargestellt. Im rechten unteren Diagramm ist zusätzlich exemplarisch die Nachgiebigkeit der Spindelwelle für die vierte Biegeeigenfrequenz von $f = 1.755 \text{ Hz}$ für eine komplett umlaufende Kraft abgebildet. Zu erkennen ist die winkelabhängige Nachgiebigkeit der Spindel, verursacht durch die winkelabhängige Änderung des Flächenträgheitsmomentes durch das Bohrmuster der Übertragungsbohrungen. Als Schrittweite $\Delta\varphi$ der umlaufenden Kraft wurde hierbei ein Winkelschritt von $\Delta\varphi = 10^\circ$ gewählt. Um ein Aliasing von hochfrequenten Änderungen der Nachgiebigkeit auszuschließen, wurden zusätzlich Untersuchungen mit kleineren Winkelschrittweiten der umlaufenden Kraft durchgeführt. Hierbei zeigte sich jedoch, dass mit der ausgewählten Winkelschrittweite eine ausreichende feine Auflösung vorliegt.

Abbildung 28 stellt den frequenzabhängigen Nachgiebigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Drehwinkels für die endgültige Variante mit acht Übertragungsbohrungen dar.

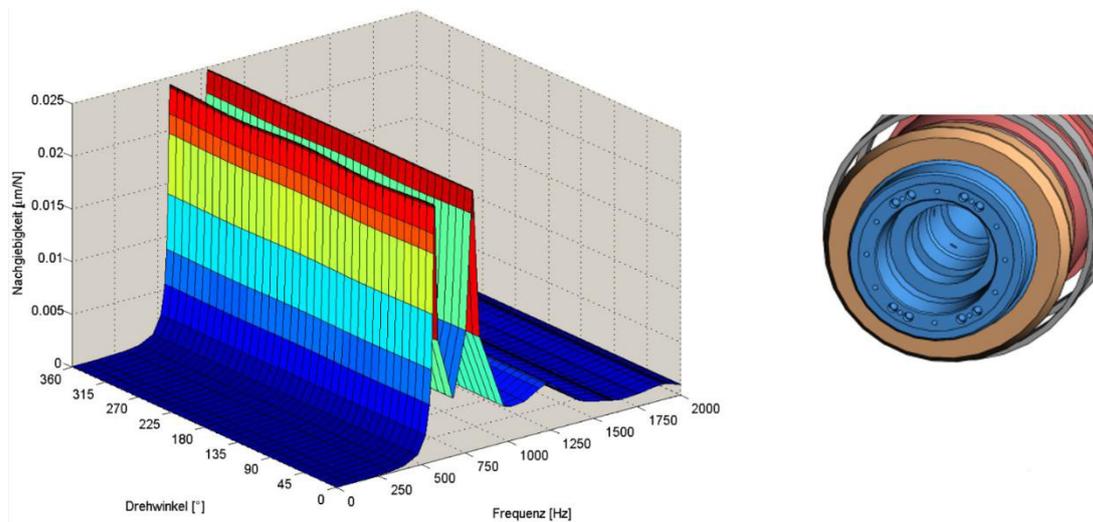


Abbildung 28: Frequenzabhängiger Nachgiebigkeits-3D-Plot in Abhängigkeit des Drehwinkels für die endgültige Variante mit acht Bohrungen

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die dynamische Nachgiebigkeit der Spindel nur geringfügig von den zusätzlich eingebrachten Bohrungen beeinflusst wird. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Übertragungsbohrungen zeigt, dass die größte Schwankung der Nachgiebigkeit bei der vierten Eigenfrequenz des Systems mit sechs Bohrungen und bei der ersten Eigenfrequenz des Systems mit acht Bohrungen auftritt, vgl. Abbildung 29. Die Änderungen der anderen untersuchten Eigenfrequenzen liegen dabei nur in einer Größenordnung von weniger als 2%. Eine Erklärung dieser größeren Winkelabhängigkeit der vierten Eigenmode liegt im Zustand der Massen- und Steifigkeitsverteilungen der Spindelwelle. Bei einer späteren Zerspanung liegt die anregende Kräfteinleitung der Anregung der Spindel in den Schneiden des Werkzeugs. Je nach deren Anordnung auf dem Umfang beim Einspannen des Werkzeugs liegt so ein winkelabhängiges Steifigkeitsverhalten der Spindel vor. Hieraus kann eine ungleiche Beanspruchung der Zähne am Werkzeug resultieren, da diese sich auf einer mehr oder weniger steifen Winkellage der Spindelwelle befinden. Ein möglicher Einfluss dieses Effekts auf eine Prozessinstabilität beim Zerspanen ist denkbar und wird weiter am Prototyp genauer messtechnisch untersucht.

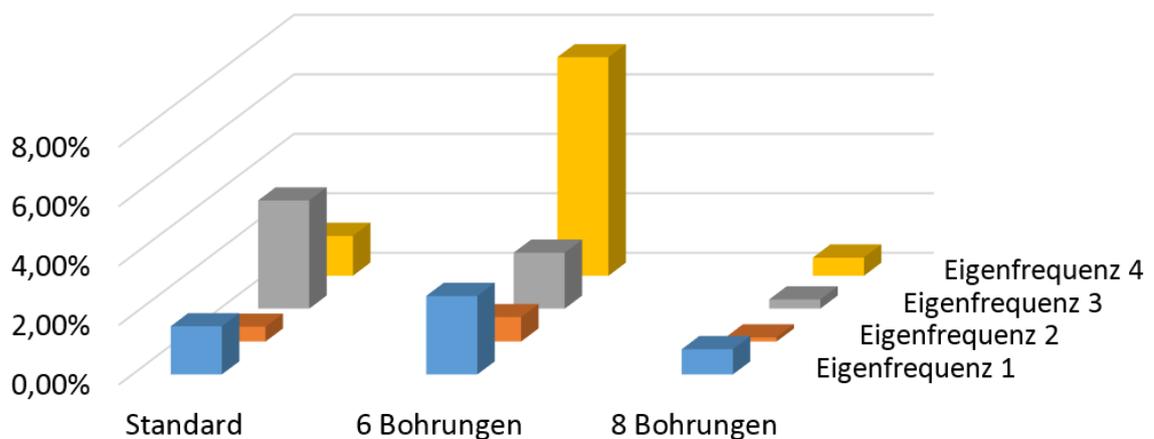


Abbildung 29: Schwankung der Nachgiebigkeit über dem Angriffswinkel der anregenden Kraft

Adapterflansch zum Nachrüsten an bestehenden Werkzeugmaschinen:

Bei zukünftigen Werkzeugmaschinen kann die BaZMod-Schnittstelle direkt in die Spindel integriert werden, wodurch dem Anwender nur geringe zusätzliche Investitionskosten entstehen. Dem gegenüber steht der große Integrationsaufwand in bestehende Maschinen, da hier ein Ersetzen der Spindel notwendig wäre.

Damit bestehende Werkzeugmaschinen dennoch kostengünstig mit einer BaZMod-Schnittstelle ausgestattet werden können, wurde ein Nachrüstadapter entwickelt (Abbildung 30). Dieser Adapter wird im Werkzeugmagazin geführt und bei Bedarf in die Spindelnase eingewechselt. Das zu betreibende CPS wird dann mithilfe einer Werkzeugaufnahme am Nachrüstadapter montiert.

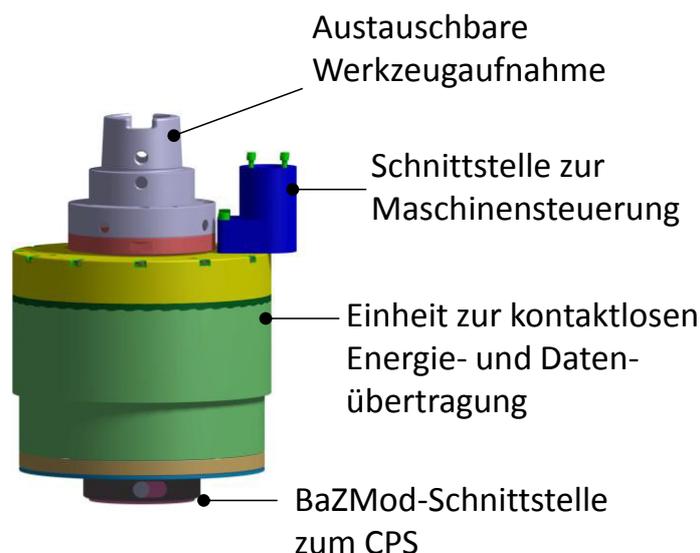


Abbildung 30: Nachrüstbarer Adapter zur Integration der BaZMod-Schnittstelle in bestehende Werkzeugmaschinen

Der Adapterflansch ist modular aufgebaut. Integrale Bestandteile des Nachrüstadapters sind ein eigengelagerter induktiver Drehübertrager zur Daten und Energieübertragung sowie die werkzeugseitigen BaZMod-Kontakte an der HSK-Flanschfläche. Die elektrische Energie wird in zwei Leistungsstufen bereitgestellt. Für den Betrieb von Sensorik und die Kommunikation mit der Produktionsumgebung wird eine Spannung von 5 V und bei einer maximalen Stromstärke von 6 A bereitgestellt. Um auch aktorische Werkzeuge mit großer Leistungsaufnahme betreiben zu können, existiert ebenfalls eine elektrische Schnittstelle mit einer Spannung von 48 V und 12,5 A.

An der Werkzeugspannvorrichtung wird die Verbindung zum intelligenten Werkzeug über Kontakte auf der HSK-Flanschfläche hergestellt. Diese sind so gestaltet, dass die äußere Kontur der Spannvorrichtung nicht verändert wird und somit herkömmliche Werkzeuge weiterhin eingesetzt werden können. Insgesamt befinden sich auf der HSK-Flanschfläche acht Kontakte, von denen jeweils vier zur Datenübertragung und vier zur Energieübertragung genutzt werden.

Damit der Adapterflansch an unterschiedlichen Werkzeugmaschine genutzt werden kann, ist die Werkzeugaufnahme austauschbar gestaltet. Somit kann der Adapter an Spindeln mit verschiedenen Spannsystemen genutzt werden. Medien wie Kühlschmierstoff und Druckluft können wie bei bisherigen Spindeln durch den Adapterflansch geleitet werden. Somit bietet der Nachrüstadapter eine einfache Möglichkeit, bestehende Werkzeugmaschinen mit der BaZMod-Schnittstelle auszustatten.

AP 2.3 Entwurf eines Reglerbauskastens

Im Rahmen des AP 2.3 haben sich das IfW und das ISW an der Entwicklung des Reglerbauskastens beratend beteiligt. Die Reglermodule wurden gemeinsam diskutiert und durch RMV umgesetzt.

Der Regler soll universell für verschiedene Anwendungsfälle eingesetzt werden können. Für die zerspanenden Prozesse existieren meist keine expliziten Modelle, mit denen der Prozess mathematisch beschrieben werden kann. Dies ist jedoch für eine konventionelle, analytische Reglerauslegung notwendig. Aus diesem Grund werden zur Definition des Reglerverhaltens Fuzzy-Mengen eingesetzt. Diese ermöglichen es, mithilfe unscharfer Zugehörigkeitsfunktionen einen beliebigen Prozess zu beschreiben. Dabei werden die Regelgröße sowie deren zeitlichen Veränderungen im Regler anhand linguistischer Terme bewertet. Für die Reglerauslegung ist es notwendig, die Zugehörigkeitsfunktionen geeignet zu definieren. Durch die Verwendung linguistischer Terme ist es möglich, das meist implizit vorhandene Erfahrungswissen der Werker direkt in die Reglerauslegung einfließen zu lassen und als festen Parametersatz auf dem Werkzeug zu speichern.

In einem geschlossenen Regelkreis wird durch die Rückführung der Regelgröße meist ein gutes Prozessverhalten ermöglicht. Wenn eine direkte Rückführung nicht möglich ist oder die Streckenparameter sehr stark schwanken, sollten die Schwankungen berücksichtigt werden. Hierzu sind die wesentlichen Einflussfaktoren bzw. Störgrößen auch außerhalb der Systemgrenzen zu ermitteln und den Regler dementsprechend anzupassen. Zur ganzheitlichen Erfassung und Kategorisierung erfolgt eine Ermittlung über das Ursache-Wirkungs-Diagramm nach Ishikawa.

Bisher ist die Prozessregelung bei Fräsmaschinen nicht im Fokus der Forschungsarbeiten. Stand der Technik ist die Vorgabe initialer Werte für die Schnittgeschwindigkeit und für den Vorschub anhand von Tabellen. Darüber hinaus erfolgt in vielen Fällen eine manuelle Anpassung der Parameter in Abhängigkeit der realen Zerspanungsbedingungen, die der Bediener über die akustischen Emissionen der Maschine, die Bewertung der Oberflächengüte sowie diverse weitere Prozessgrößen schätzt. Damit erfolgt die Prozessregelung anhand der geschätzten Prozessrobustheit oder Belastung über den Bediener, der integraler Bestandteil des Regelkreises ist. Ein hoher Anteil subjektiver Einschätzungen sowie eine vorsichtige Wahl der Prozessparameter resultieren daraus. Dies schränkt den Prozess hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowie der Berücksichtigung hochdynamischer Störgrößen wie einem Rattern oder Materialinhomogenitäten stark ein. Es existieren verschiedene Weiterentwicklungen der Vorschubregelung, bei der die Belastung auf das Werkzeug mithilfe der Aufnahmeleistung der relevanten Antriebsmotoren geschätzt und als Regelgröße eingesetzt wird. Darüber hinaus existieren unterschiedliche Erweiterungen für Werkzeugspannmittel, welche die Belastung auf das Werkzeug messen.

Die nachfolgend aufgeführten Merkmale charakterisieren den Fräsprozess:

- Die Messung der Ausgangsgröße „Bauteilqualität“ ist nicht oder nur stark zeitverzögert möglich.
- Die dem Prozess zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten sind analytisch nur ungenügend abbildbar, scheinbar nichtlinear oder zeitvariant.
- Diverse Einflussgrößen verursachen ein scheinbar nicht reproduzierbares Prozessverhalten.

- Die Bestimmung weiterer Prozessgrößen wie beispielsweise der Materialzähigkeit oder der Verschleißzustand sind nicht oder nur sehr aufwändig möglich.

Jede dieser Eigenschaften erschwert den Einsatz einer Regelung, insbesondere das Fehlen der Regelgröße. Durch das Zusammentreffen dieser Faktoren ist es unmöglich, bestehende Regelungskonzepte mit den bisherigen Werkzeugen im Produktivbetrieb einzusetzen. Diese Voraussetzungen sind an anderen Industrieprozessen ebenfalls gegeben.

Das übergeordnete Ziel ist die optimale Ausnutzung der Werkzeugfähigkeiten unter den jeweilig geltenden Produktionsbedingungen. Für den Fräsprozess in der Vorbearbeitung ergeben sich als Zielgrößen das Zeitspannvolumen und die Lebensdauer des Werkzeugs. Dies steht in direktem Zusammenhang mit einer belastungsabhängigen Regelung des Vorschubes.

Um den Schruppprozess geeignet zu regeln, ergeben sich die folgenden Teilschritte:

- die Abbildung des relevanten Prozesses in ausreichendem Detaillierungsgrad
- die Messungen der Werkzeugbelastungen an der Kraftangriffsstelle

Für die Entwicklung eines Reglers ist im ersten Schritt eine Systemanalyse durchzuführen. Hier werden neben dem eigentlichen Prozess insbesondere die weiteren technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen analysiert.

Bei der Schruppbearbeitung ist ein maximales Zeitspannungsvolumen anzustreben, ein Werkzeugbruch aufgrund einer Überlastung ist jedoch unbedingt zu verhindern. Ist das Werkzeug mit Intelligenz ausgestattet, so enthält dieses werkzeugspezifische Initialwerte, maximal zulässige Torsions-, Biege- und Druckbelastungen und den geschätzten Werkzeugverschleiß. Damit kann der reale Werkzeugzustand deutlich besser beschrieben werden.

Der Vorschub sowie die weiteren Stellgrößen werden so gewählt, dass ein maximales Zeitspannvolumen bei minimalen Werkzeugkosten realisiert wird. Die Ausnutzung der Werkzeuge wird erhöht, wodurch sich die Werkzeugkosten verringern lassen. Die Schnittparameter werden durch den Regler an die aktuellen Zerspannungsbedingungen angepasst. Während des Schruppens wird als Zielgröße ein maximales Zeitspannvolumen vorgegeben, bei der Endbearbeitung wird die Oberflächengüte stärker gewichtet. Um diese Flexibilität zu ermöglichen, muss eine variable Gütefunktion der rückgeführten Prozessgrößen gebildet werden. Die Gewichtung der Faktoren erfolgt anhand der jeweiligen Zielgrößen.

Für die prozessintegrierte Rauheitsmessung ist ein größerer Datenaustausch zwischen der Maschine und dem Messmittel nötig als bisher. Darüber hinaus ist die Rauheitsmessung empfindlich gegenüber Verschmutzungen oder Kühlschmierstoffresten. Für eine prozesssichere Integration der Rauheitsmessung müssen deshalb robuste Messverfahren eingesetzt oder der Tastschnittsensor vor negativen Prozesseinflüssen geschützt werden. Aktuell werden Sensoren zur Erfassung der Regelgröße evaluiert.

Für den Aufbau eines Regelungssystems wurden dabei verschiedene Konzepte erarbeitet. Durch den Einsatz des Fuzzy-Reglers müssen die Einflussgrößen nicht streng analytisch beschreibbar sein. Es ist ausreichend, wenn die Zusammenhänge quantitativ formuliert werden. Eine Adaption anhand der Einflussgrößen kann durch eine Zugehörigkeitsbeschreibung des jeweiligen Wirkungsbereichs vorgenommen werden.

Um das Regelungssystem an einer realen Strecke auslegen zu können, wurde in einem ersten Schritt ein geeignetes Prozessmodell aufgebaut. Dieses wurde durch ein neuronales Netz realisiert, welches auf Basis des Vorschubs des Werkzeugs die Schnittkraft ermittelt. Dazu wurden mehrere Untersuchungen mit verschiedenen Bohr-Werkzeugen an Werkzeugmaschinen

durchgeführt, welche zur Verfügung standen. Auf Basis der daraus gewonnenen Daten wurden mehrere Netze generiert. Diese bilden die unterschiedlichen Bohrprozesse ab und können einfach gegeneinander ausgetauscht werden. Diese wurden in einem weiteren Schritt verifiziert, sodass diese eine valide systemtechnische Repräsentation der realen Prozesse darstellen. Dadurch können Arbeiten am Regelungssystem parallel zu Arbeiten am intelligenten Werkzeug durchgeführt werden, welche im Kapitel „AP 4 Prototypische Umsetzung“ näher erläutert werden. Zudem führen falsche Einstellungen der Regler so zu keiner Beschädigung der Hardware.

5.3 AP 3: Entwicklung informationstechnischer Ansätze

AP 3.1: Entwurfsmethode und Hardware-Software-Architektur

Für eine vollständige und flexible Einbindung von intelligenten Werkzeugen in die Werkzeugmaschine bietet sich die Verwendung des in der Maschine vorhandenen Ethernet-basierten Feldbusses an. Um während des Betriebs der Maschine keine Geräte an diesem Bus austauschen zu müssen wird ein am ISW entwickeltes festes Gerät, im Folgenden Interfaceelektronik genannt, in die Maschine integriert, welches die Kommunikation zum letztendlich verwendeten intelligenten Werkzeug über eine serielle Schnittstelle realisiert. Ein Vorteil dieser Realisierung ist auch die geringe Anforderung an die Kommunikationshardware im intelligenten Werkzeug. Zusätzlich ermöglicht dieser Aufbau die Kommunikation zwischen dem intelligenten Werkzeug und weiteren externen Geräten oder internen Geräten über andere Schnittstellen, wie beispielsweise bei Messtastern der SKIP-Eingang am Antriebsverstärker.

Abbildung 31 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen vorhandenen Kommunikationspartner, die Kommunikationswege und die jeweils verwendete Kommunikationsform. Anzumerken ist hierbei, dass für einzelne Daten stets nur ein Weg von einer Station zur nächsten besteht. Bei mehreren vorhandenen Verbindungen, die scheinbar parallel zueinander sind, werden unterschiedliche Daten kommuniziert. Der dargestellte innere Aufbau des CPS auf der rechten Seite des Bildes ist lediglich eine Möglichkeit unter vielen weiteren. Gemeinsam ist jedoch allen möglichen Varianten, dass die Kommunikation über RS-422-Schnittstellen erfolgt.

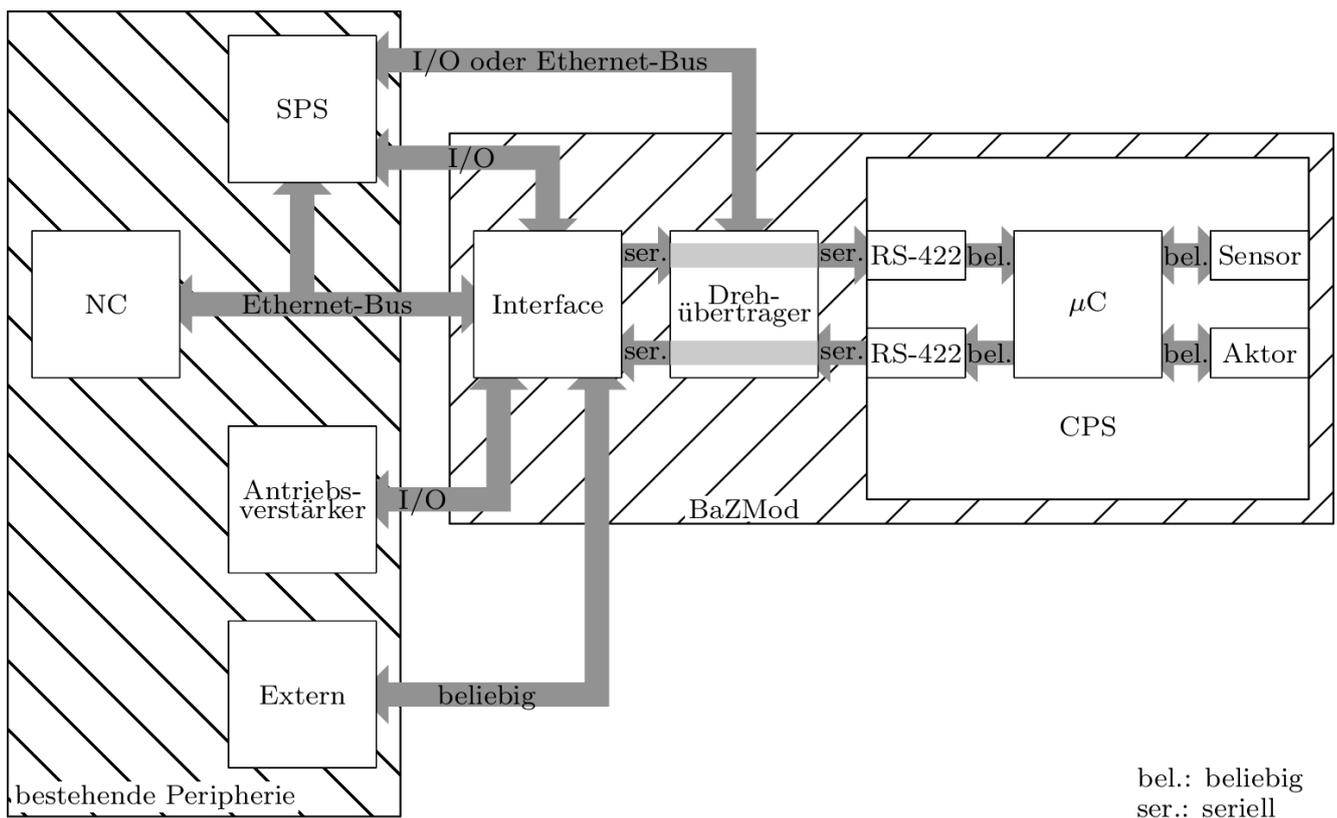


Abbildung 31: Gesamtübersicht der Kommunikation

Die Software auf der Interfaceelektronik repräsentiert das Gesamtsystem aus CPS und Interfaceelektronik gegenüber der Maschine. Um auch für bislang nicht bekannte Anwendungen verwendbar zu sein, ist eine Konfigurierbarkeit unerlässlich, wobei diese möglichst einfach gehalten werden muss, um in der praktischen Anwendung zu bestehen. Andererseits müssen große Freiheiten bei der Konfiguration bestehen, um keine Anwendungen auszuschließen. Dies gelingt durch bedarfsgerechte Verwendung dreier verschiedener Konfigurationsverfahren. Im einfachsten Fall wird die Software auf der bestehenden Hardware durch XML-Dateien konfiguriert, welche Informationen über die Kommunikation und das Werkzeug beinhalten.

Werden mehr Freiheiten benötigt, wie Kommunikation zu anderen Geräten, oder die Verwendung eines anderen als des vordefinierten Kommunikationsrahmens auf der seriellen Schnittstelle, können Teile der Gesamtfunktionalität durch dynamisch ladbare Bibliotheken ersetzt oder ergänzt, die bestehende Grundsoftware und Hardware allerdings weiter verwendet werden.

Sollte es Anforderungen geben, die auf diesem Weg nicht erfüllt werden können, ist es ebenfalls möglich eine herstellereigene Hardware zu verwenden. Hierbei wird lediglich auf die an der Spindel vorhandenen Kontakte für Energie- und Datenübertragung, sowie den Drehüberträger zurückgegriffen, ansonsten ist der Aufbau nahezu uneingeschränkt. Nachteilig wirkt sich hierbei allerdings der erhebliche zusätzliche Entwicklungsaufwand für die Hardware und für die Integration in die Maschine aus. Ebenfalls ist nicht ausgeschlossen, dass Probleme wie der gegenseitige Ausschluss von Schnittstellen wieder auftreten, welche mit der BaZMod-Schnittstelle gelöst werden sollen.

Bei Verwendung der vorgeschlagenen Interfaceelektronik mit einer der beiden oben vorgestellten Konfigurationsmöglichkeiten wird das Verhalten des Gesamtsystems aus Interface und CPS gegenüber der Maschine über eine Zustandsmaschine mit 9 Zuständen repräsentiert.

Diese Zustände beschreiben ob die Energieversorgung eingeschaltet ist, ob eine Kommunikation aufgebaut ist, ob das CPS initialisiert ist, ob das CPS einen Ablauf eigenständig durchführt, oder ob ein Fehler vorliegt. Mit Ausnahme des von überall erreichbaren Fehlerzustandes ist die genannte Zustandsmaschine in Abbildung 32 inklusive der erlaubten Transitionen dargestellt.

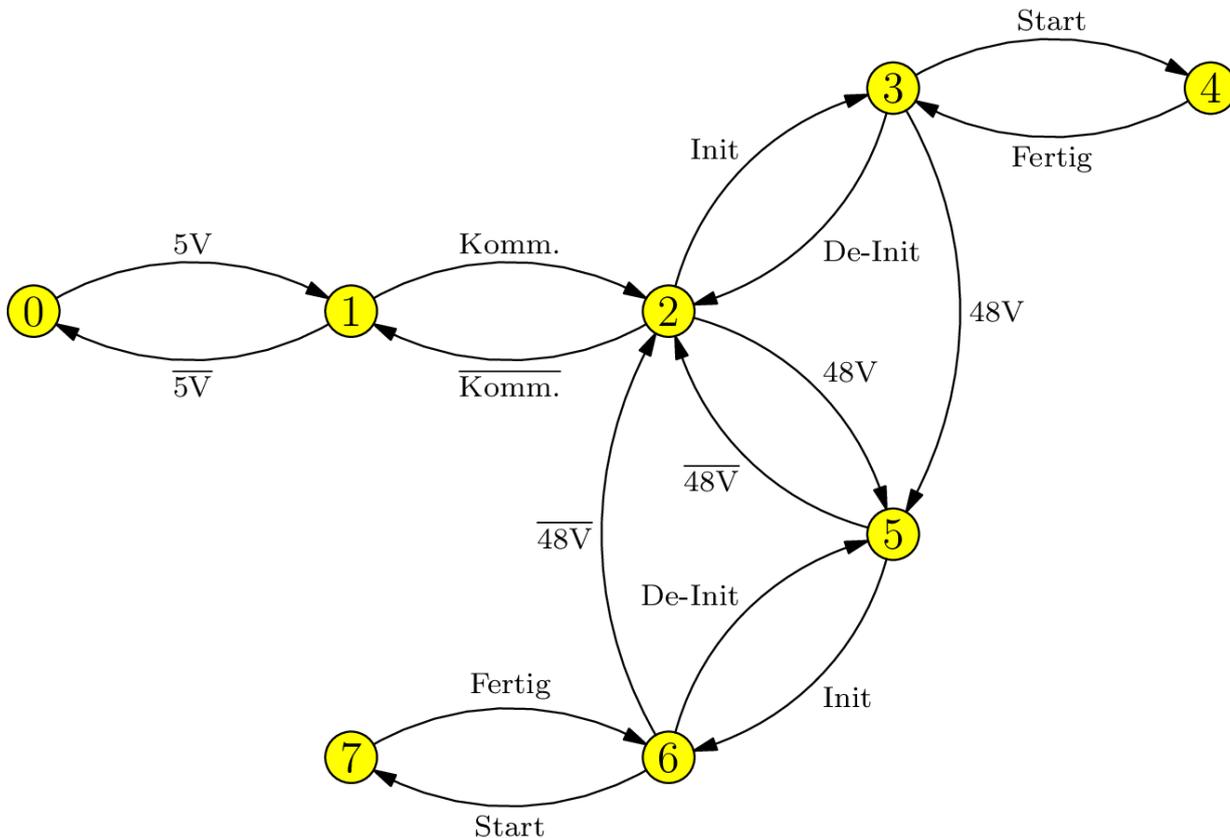


Abbildung 32: Zustandsmaschine des CPS-Interface-Gesamtsystems

Die zu definierenden Schnittstellen an der Spindelplanfläche, sowie die Leitungsdurchführung in der Spindel sind entsprechend der mechanischen und physikalischen Gegebenheiten in die Spindel integriert worden. Ein Normungsvorschlag der Schnittstelle soll den Entwurf festhalten und in der Zukunft etablieren. Sensoren des Spannsystems, im Detail ein Kraft-sensor zur Überwachung des Prozessparameters Spannkraft, wurde als Entwurf durch Röhm vorgeschlagen und präsentiert. Jedoch konnte dieser im Verlauf des Projektes nicht mehr umgesetzt werden, da die Belegungen der Eingänge im Drehübertrager schon zu weit fortgeschritten waren.

Die Datenübertragung zwischen dem Werkzeug und der Maschinensteuerung ist so zu konzipieren, dass ein einheitliches Vorgehen bei verschiedenen Anwendungen angewandt werden kann. Aus dem Stand der Technik ist die induktive Datenübertragung bekannt, die eine Echtzeitkommunikation erlaubt. Die Zielwerte der Anforderungsliste können hiermit jedoch bisher noch nicht erreicht werden. Drahtlose Datenübertragungskonzepte erlauben ebenfalls eine relativ robuste Übertragung und sind aus dem Consumer-Bereich verfügbar. Die bisher realisierte Kommunikation ermöglicht die automatische Identifizierung der Werkzeuge und die flexible Übertragung unterschiedlicher Daten, sowohl die Initialisierung zur Prozessbeschreibung als auch die Übertragung wesentlicher Prozessgrößen wie die Regelgröße oder die Stellgrößen. Da unterschiedliche Werkzeugtypen variabel Daten mit der Steuerung austauschen müssen, muss die Kommunikation sehr flexibel realisiert sein.

Forschungsbericht

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

Während im allgemeinen Teil die zugrundeliegende Kommunikationsstruktur abgestimmt wird, erfolgt anschließend die Eignungsprüfung des Werkzeugs für die Bearbeitungsaufgabe. Damit wird verhindert, dass beispielsweise mit einem Schruppfräser eine Schlichtoperation durchgeführt wird. Im Anschluss erfolgt die Initialisierung der Kommunikation, bei der die Daten sowie deren Formate und Reihenfolge definiert und interpretiert werden. Danach erfolgt der Austausch der Nutzdaten, die initial, ereignisgesteuert und auch kontinuierlich übertragen werden können.

Für die erste Implementierung wurde auf Bauteile aus dem Consumer-Bereich zurückgegriffen. Hier sind leistungsfähige Platinen zu geringen Kosten erhältlich, wobei bereits eine Vielzahl an Funktionen integriert ist. Dazu wurden aus Projektmitteln die Platinen „Raspberry Pi“ und „Arduino“ sowie die dazugehörige Sensorik beschafft. Das Werkzeug oder auch die grafische Benutzeroberfläche tauschen als Clients Daten mit der Maschinensteuerung aus. Die Maschinensteuerung dient als Informationsverteiler. Dies ermöglicht die flexible Erweiterung der Kommunikation und die Verwaltung mehrerer Werkzeuge.

Für Hersteller, die weiterhin eine proprietäre Schnittstelle verwenden wollen, wurde unter Zusammenarbeit von KOMET und Trigerion eine „Umschaltbox“ (Multiplexer) entwickelt und realisiert. Diese stellt über die Maschinensteuerung eine Verbindung zur jeweiligen Anpasselektronik der verschiedenen CPS-Anbieter her. Es ergibt sich somit ein Aufbau entsprechend Abbildung 33.

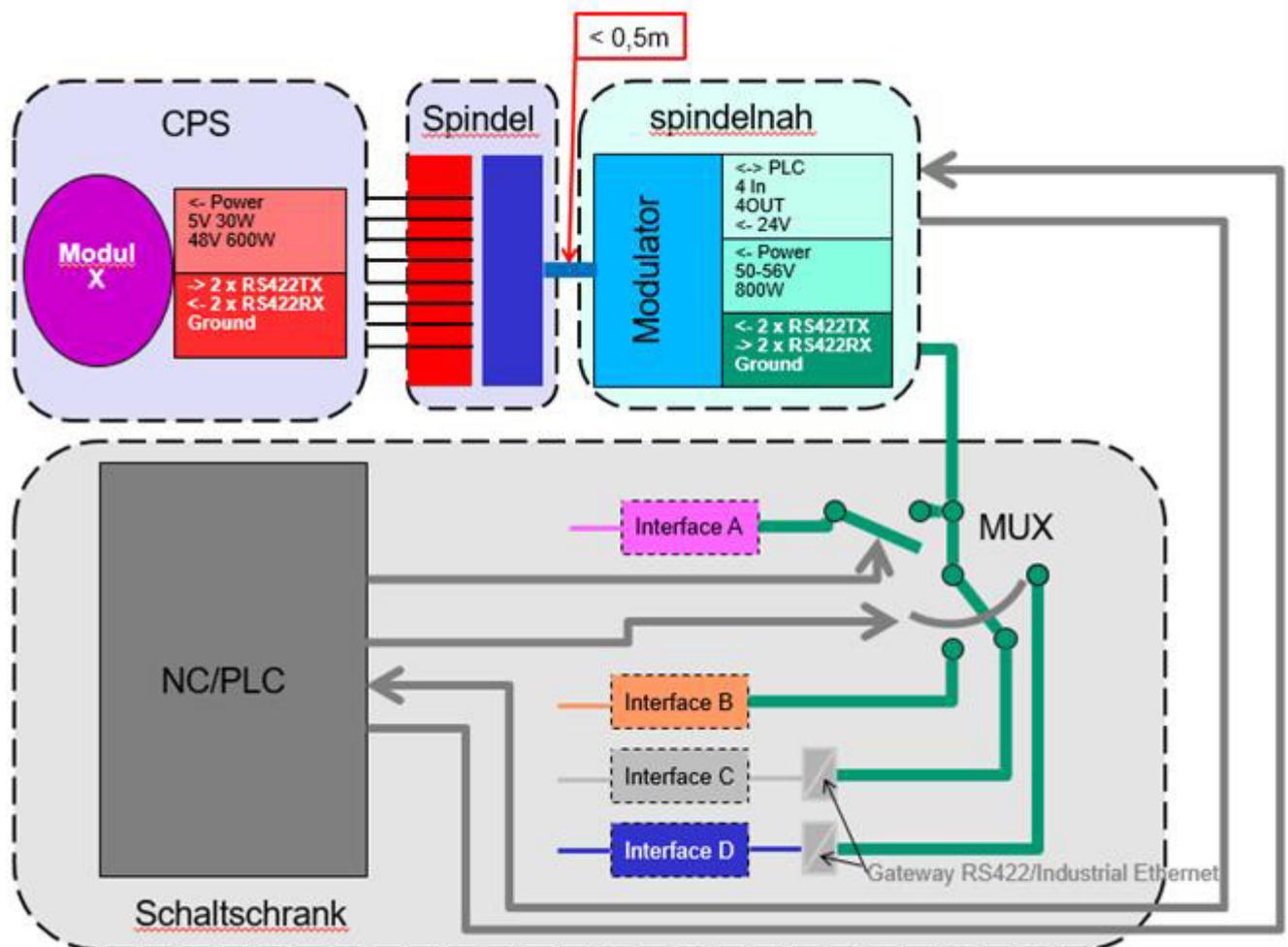


Abbildung 33: Kommunikationsstruktur CPS ↔ Maschinensteuerung und Energieversorgung

AP 3.2: Funktionale Integration intelligenter Sensor-Aktor-Systeme

Im Rahmen des AP3.2 wurden vom IfW Versuchsaufbauten für die Durchführung von Funktions- und Dauertests an Versuchsmustern (Schnittstelle-Spindelnahe) konzipiert und entwickelt. Abbildung 34 stellt die Aufnahme der Kontaktierung zum Prüfstand dar. Die beiden Seiten der Kontaktierung (Pos. 5: WKZ-Seite und Pos. 6: Spindel-Seite) werden von dem Projektpartner Fa. Mapal angefertigt und dem IfW für die Versuche zur Verfügung gestellt. Die Kontaktierung wird mittels zwei Anschlussplatten 1 und 3 zum Prüfstand befestigt. Zwischen den beiden Platten wird eine Gummimatte 2 integriert, um die WKZ-Seite „schwimmend“ zu lagern. Diese Anordnung bildet quasi eine Werkzeugwechslerfunktion nach, und ermöglicht gleichzeitig die Einstellung der Winkellage bzw. eine Verkipfung der WKZ-Seite.

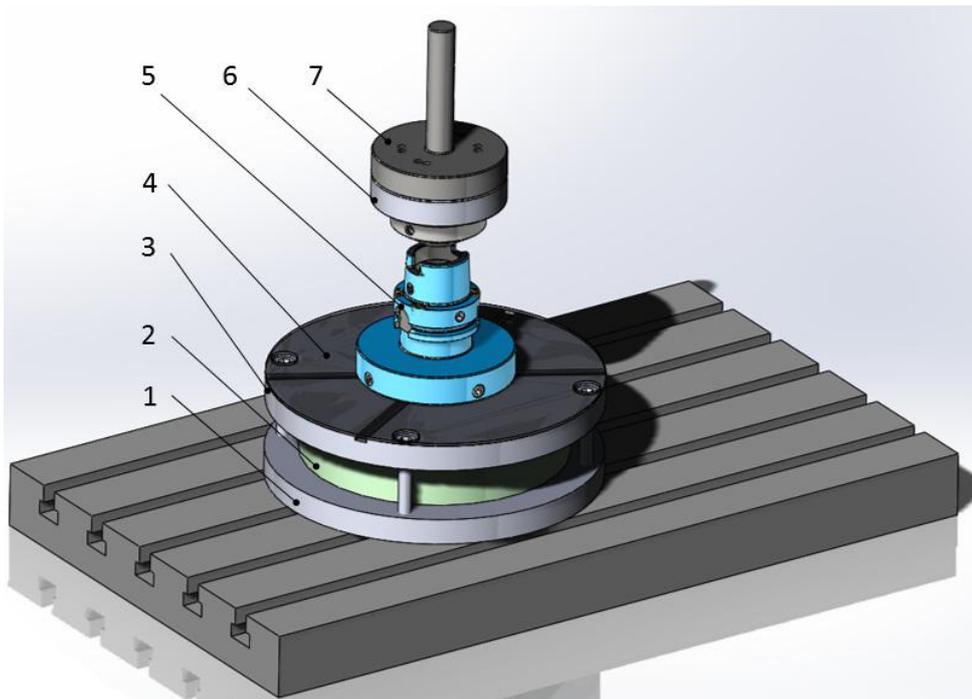


Abbildung 34: Prüfvorrichtung zur Untersuchung der Kontaktierung an der Schnittstelle-Spindelnahe (1.Grundplatte, 2.Gummimatte, 3.Anschlussplatte, 4.Abdeckung, 5. WKZ-Seite, 6.Spindel-Seite, 7.Aufnahmedorn)

Der gesamte Prüfstand ist in Abbildung 35 abgebildet. Die vorherige senkrechte Anordnung der zu prüfenden Komponenten (WKZ-Seite und Spindel-Seite) wurde auf 90° gedreht. Die endgültige waagerechte Orientierung der Kontaktierung wurde damit mit der üblichen Spindelachsenorientierung an Werkzeugmaschinen konform gemacht.

Die Vorrichtung ermöglicht die Durchführung sowohl von Funktions- und Dauertests als auch von elektrischen Prüfungen bei geöffneter und/oder geschlossener HSK-Schnittstelle.

Nach der Inbetriebnahme der Testvorrichtung wurden die ersten funktionalen Tests durchgeführt. Die neue Schnittstelle wurde zunächst ohne mechanische und elektrische Last auf Funktionalität überprüft. Hierbei konnten keine Auffälligkeiten beim Ein-/Abkuppeln festgestellt werden.



Abbildung 35: Testvorrichtung zur Durchführung von Funktions- und Dauertests.

Weiterhin wurden die Isolations- und Datenübertragungsgüte der intelligenten Schnittstelle untersucht (Versuchsaufbau siehe Abbildung 36). Die Isolationsgüte wurde zunächst durch den DAR-Wert (dielektrisches Absorptionsverhältnis) bestimmt. Die Messungen wurden unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (Kontakte trocken, unter Taubildung durch Luftfeuchtigkeit und mit KSS befeuchtet) mittels eines Widerstandsmessgerät vom Typ C.A.6547 durchgeführt. Gemessen wurden die Ableit- bzw. Leckströme der Kontakte zum Gehäuse bei verschiedenen Prüfspannungen (100 V, 500 V und 1.000 V). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der DAR-Wert ungeeignet zur Beurteilung der Isolationsgüte der Schnittstelle ist. Es wurden keine reproduzierbaren Messergebnisse erzielt. Dies lässt sich mit dem relativ hohen Wert des Leckstroms erklären, der bei feuchten bzw. verunreinigten Kontakten den Absorptionsstrom übertrifft. Zur Beurteilung der Isolationsgüte wurde weiterhin der Isolationswiderstand R_{iso} herangezogen. Bei trockenen Umgebungsbedingungen wurde ein Wert von über 400 G Ω ermittelt.

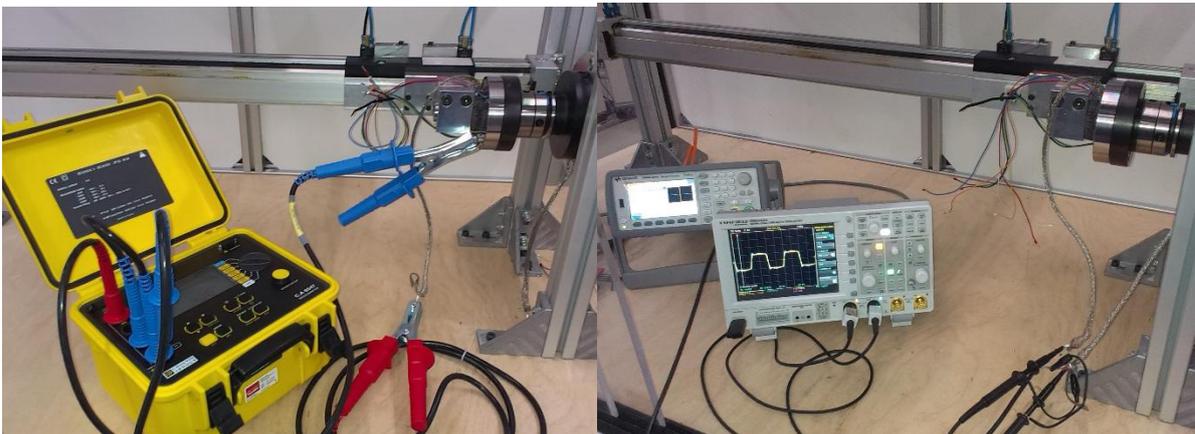


Abbildung 36: Aufbau für elektrische Messungen: links: Isolationswiderstand, rechts: Datenübertragung

Ferner wurde das Datenübertragungsverhalten der Kontaktierung untersucht. Hierfür wurden zwei Signaltypen zur Beurteilung der Übertragungsgüte ausgewählt:

- Signaltyp 1: rechteckiges Signal mit einer Frequenz von 5 MHz,
- Signaltyp 2: PRBS – Pseudozufällige Bit Sequenzen mit einer Datenrate von 10 Mbit.

Das jeweilige Signal wurde mittels eines Signalgenerators vom Typ 33522B am Eingang der Kontakte appliziert. Am Ausgang wurde das Output-Signal mittels eines Oszilloskops erfasst

und mit dem Inputsignal verglichen. Eine Gegenüberstellung der Input- mit den Output-Signalen ist in Abbildung 37 dargestellt. Es konnte ein nahezu unverändertes Datenübertragungsverhalten bei beiden Signaltypen festgestellt werden. Das Signalübertragungsverhalten ist unkritisch.

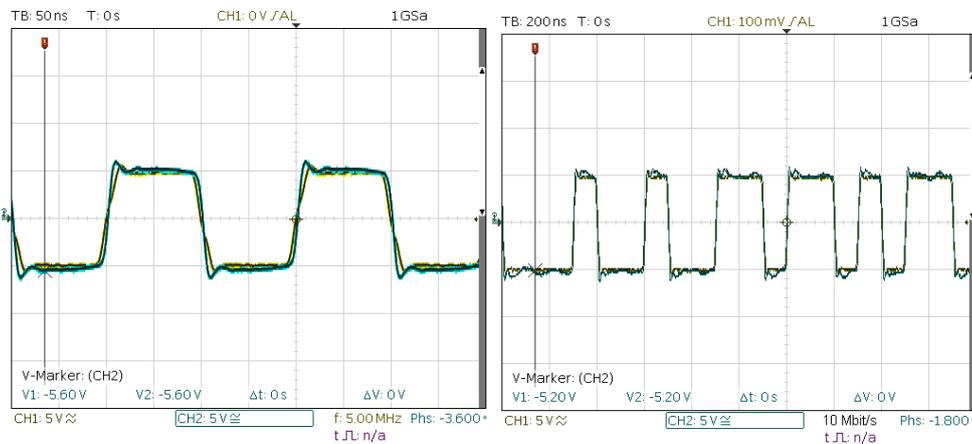
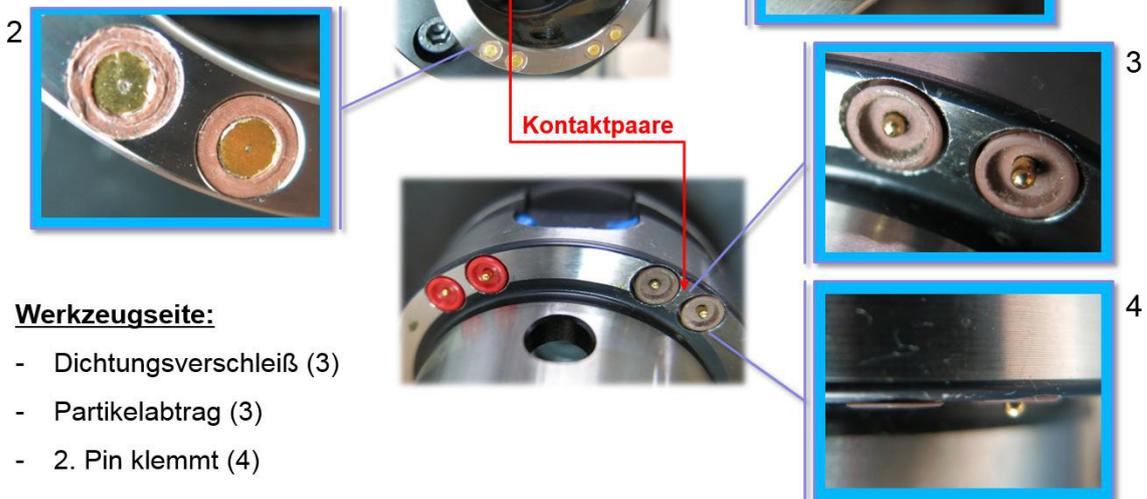


Abbildung 37: Datenübertragung Input/Output: links: Signaltyp 1 – 5 MHz Rechteck, rechts: 10 Mbit PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence)

Weiterhin wurde die Dauerfestigkeit der Kontaktierung zunächst im trockenen Zustand untersucht, welcher dem „worst case“ hinsichtlich Verschleißanfälligkeit der Kontakte entspricht. Dafür wurden mit der oben gezeigten Prüfvorrichtung 100.000 Zyklen gefahren, bei dem die Schnittstelle geöffnet und geschlossen wird. Ziel der Untersuchung war die Ausdauer sowohl der Kontaktpins als auch der Dichtungselemente zu überprüfen. Bei 50.000 Zyklen wurde eine Sichtkontrolle durchgeführt, bei der lediglich eine leichte Spurenbildung auf der Isolationsoberfläche der Spindel-Seite durch Materialabtrag der gegenüberliegenden Dichtung festgestellt wurde. Auf der Werkzeugseite konnten keine weitere Auffälligkeiten festgestellt werden. Der Versuch wurde nach Säuberung der Kontakte fortgesetzt.

Spindelseite:

- weitere Spurenbildung auf Isolatoroberfläche (1)
- mit Verschleiß (2)



Werkzeugseite:

- Dichtungverschleiß (3)
- Partikelabtrag (3)
- 2. Pin klemmt (4)

Abbildung 38: Verschleiß nach 100.000 Zyklen Dauerbetrieb

Nach weiteren 50.000 Zyklen Dauerbetrieb wurden deutlich stärkere Verschleißerscheinungen festgestellt. Die Spuren durch Materialabtrag auf der Isolatoroberfläche wurden erneut gebildet (s. Abbildung 38-1), wobei nun die gegenüberliegende Dichtung ebenfalls deutlichen Verschleiß aufweist (s. Abbildung 38-3). Auf der Spindel­seite konnte weiterhin ein Kontakt festgestellt werden, dessen Isolator deutlich verschlissen war (s. Abbildung 38-2). Auf der Werkzeug­seite trat mehrmals eine Verklebung eines Pins auf (s. Abbildung 38-4).

Ferner wurde das thermische Verhalten der Kontaktierung an der Spindelnase bei maximaler elektrischer Last (ca. 600 W) untersucht. Der Versuchsaufbau ist der Abbildung 39 zu entnehmen. Die Wärmebilder wurden mit einer Infrarot-Thermokamera aufgenommen. Die an die Kontakte angelegte Spannung betrug 48 V. Die Stromstärke wurde in 4 A Schritten von 0 bis 12 A stufenweise erhöht. Das thermische Verhalten der zu untersuchenden Kontaktpaare wurde bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen untersucht: Kontakte im trockenen Zustand, mit KSS benetzt und mit Öl benetzt. Die Messungen wurden folgendermaßen durchgeführt: nach einer ausreichend langen Aufwärmzeit der Kontaktzone durch den fließenden Strom wurde die Spindel­seite mit hoher Geschwindigkeit von der Werkzeug­seite entkoppelt und weggefahren, wobei die Infrarot-Wärmekamera zeitgleich mit einer Bildfrequenz von 10 Hz Serienbilder aufnahm. Das erste Wärmebild nach der vollständigen Entkopplung wurde ausgewertet. Der durch den kurzen Zeitverzug entstehende Temperaturfehler liegt unter 1° C.

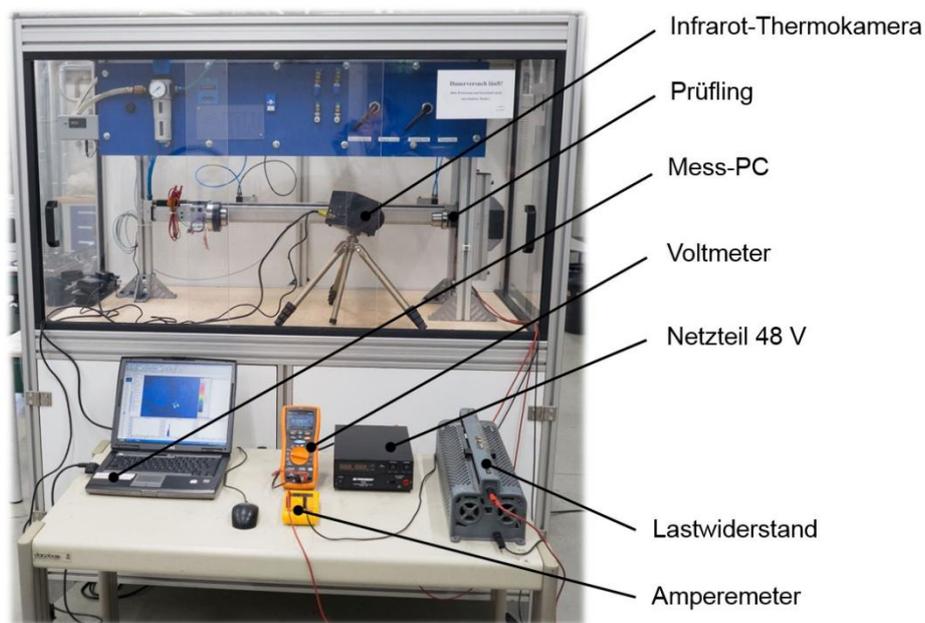
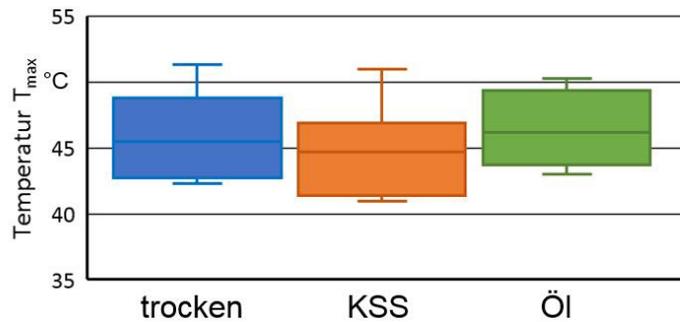


Abbildung 39: Versuchsaufbau für die thermische Untersuchungen

Die Ergebnisse aus den thermischen Untersuchungen bei maximaler elektrischer Last sind in Abbildung 40 exemplarisch dargestellt. Wie aus dem Diagramm zu erkennen ist, konnte keine Tendenz/Abhängigkeit hinsichtlich der Umgebungsbedingungen festgestellt werden. Die Erwärmung der Kontaktzone liegt mit einer Temperatur von ca. 45°C im unbedenklichen Bereich. Die höchste gemessene Temperatur betrug 51,4°C bei einer Stromstärke von 12 A.



I = 12 A

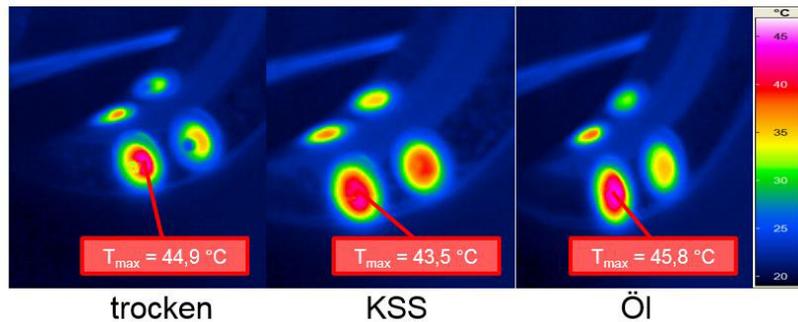


Abbildung 40: Erwärmung der Kontakte bei maximaler elektrischen Last (12 A, 576 W)

Aufgrund der festgestellten Verschleißerscheinungen der Spindelseite wurde eine neue Kontaktpaarung hergestellt. Ziel war die Dauerfestigkeit der Kontakte auf der Spindelseite zu erhöhen. Dafür wurde ein härteres Material für die Spindelseite ausgewählt. Abbildung 41 zeigt den Zustand des Isolators nach den durchgeführten Sichtkontrollen. Ein sehr leichter Materialabtrag von der gegenüberliegenden Dichtung konnte erst bei 50.000 Zyklen festgestellt werden. Die eigentliche Oberfläche des Isolators wies keine Auffälligkeiten auf.

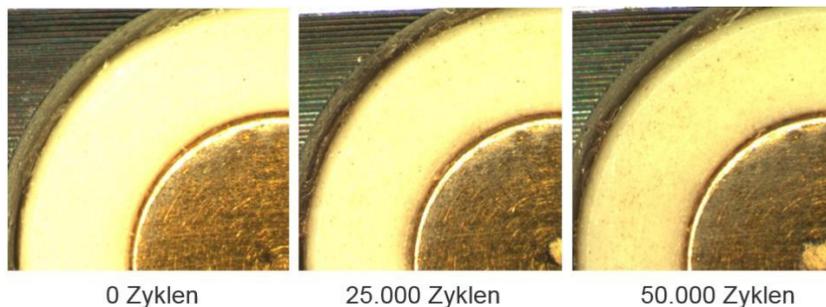


Abbildung 41: Zustand der Spindelseite mit härterem Isolator

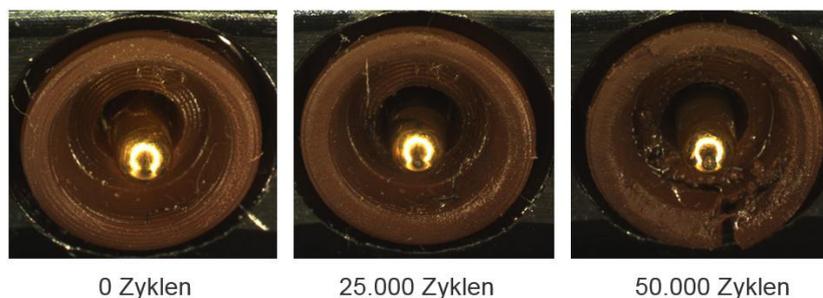


Abbildung 42: Zustand der Werkzeugseite

Genau das Gegenteil wurde bei der Dichtung auf der Werkzeugseite beobachtet (siehe Abbildung 42). Schon nach 25.000 Zyklen wurde einen größeren Verschleiß der Dichtoberfläche im Vergleich zur vorherigen Version der Kontaktierung festgestellt. Nach 50.000 Zyklen wurde die Dichtung stark beschädigt. Der Grund dafür liegt sowohl bei der härteren Gegenfläche der Spindelseite, als auch in der montagebedingten Neigung des Kontaktes nach außen.

AP 3.3: Erprobung der technischen Lösungsansätze

Die am ISW entwickelte Konfigurationsmethodik und die Umsetzung der Kommunikation von der Buskommunikation der Maschine auf die serielle Kommunikation des CPS wurde anhand eines Demonstrators mit vereinfachtem Aufbau erprobt und verifiziert. Der Aufbau besteht aus einer PC-basierten Steuerung, der Interfaceelektronik realisiert mit einem FPGA-Entwicklungsboard und einer CPS-Anwendung, die auf einer dSPACE-Hardware realisiert wurde. Auf die Verwendung eines Drehübertragers konnte in diesem Aufbau verzichtet werden, da dieser keinen Einfluss auf die Konfigurations- und Programmabläufe hat. Die Verwendung des dSPACE-Systems und des FPGA-Entwicklungsboard anstelle von Komponenten, die in einer industriellen Anwendung realistisch sind, rechtfertigt sich durch den vereinfachten Aufbau und Programmierung des Systems, sowie der deutlich verbesserten Möglichkeiten der Untersuchung von anliegenden Signalen vorliegenden Daten. Die freiere Programmierbarkeit und der einfachere Zugang zu den Daten rechtfertigen den Einsatz einer PC-basierten Steuerung statt der im Projekt angepeilten Verwendung einer Maschinensteuerung des Typs Siemens Sinumerik 840D.

Je nach verwendeter Software auf dem CPS-System bildet dieses ein aktorisches Werkzeug ab, welches eine geregelte Bewegung in Positions- oder Geschwindigkeitsregelung ausführen kann, oder ein sensorisches Werkzeug, welches Bool'sche Werte oder Positionswerte eines Digitalencoders bereitstellt. Für die verschiedenen Varianten stehen verschiedene Konfigurationsdateien zur Verfügung, und einige Eigenschaften können während des Betriebs über Parameter beeinflusst werden.

5.4 AP 4: Prototypische Umsetzung

Ein Anwendungsfall, welcher aus den Ergebnissen in AP 1 ausgewählt wurde ist ein Werkzeug, welches zur Kompensation von Ratterschwingungen im Fräsprozess eingesetzt werden kann.

Mit steigender Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit nähert sich die Anregungsfrequenz an die Eigenfrequenz an und eine Ratterschwingung entsteht. Dies führt zu einer maßgeblichen Einschränkung der Oberflächengüte des zu fertigenden Werkstücks.

Hierfür wurde am IGCV ein Werkzeug entwickelt, welches als aktives System in den Prozess eingreift. Das aktive System beinhaltet eine Datenaufnahme mittels Sensorik, eine Verarbeitungseinheit und eine Regelung, welche Aktoren am Werkzeug ansteuert um die Ratterschwingung zu kompensieren. Die verwendeten Beschleunigungssensoren ermitteln eine Abweichung des Werkzeugmittelpunkts durch eine Analyse der Amplitude der Werkzeugspitze. Die auftretenden selbstinduzierten Schwingungen werden auf das Frequenzspektrum der Beschleunigungssignale übertragen, unter Verwendung einer Fast-Fourier-Transformation. Von der Verarbeitungseinheit, die direkt auf dem Werkzeug platziert ist, können die Signale ausgewertet und die Aktoren angesteuert werden. Vier piezoelektrische Stellglieder sind radial angeordnet, um das auftretende Rattern zu kompensieren. In dem realisierten Konzept wird eine um 180° phasenverschobene Schwingung von der Aktorik eingeleitet, deren Frequenz ähnlich der Anregungsfrequenz des Ratterns ist. Mit diesem Konzept kann die Amplitude des rege-

nerativen Ratterns gedämpft oder sogar vollständig ausgelöscht werden. Eine Kommunikationsschnittstelle ist vorgesehen, um die Daten zu analysieren, beispielsweise, um einen Bruch des Werkzeugs prädictieren zu können.

Zur Umsetzung des Reglerbauskastens wurde ein Versuchsträger aufgebaut. Dieser ist ein cyberphysisches System zur Messung der Verformung von Fräswerkzeugen und automatischen Kompensation bei niedrigen Geschwindigkeiten. Dieser besteht dabei aus elektronischen Komponenten zur Auswertung der Sensorinformation und aus Aktoren zur Kompensation der Verformungen.

Die Hauptkomponente der elektronischen Systeme besteht dabei aus einem Mikrocontroller. Dieser ermöglicht es Rechenoperationen mittels Ausführung von Programmcode auszuführen. Zudem sind weitere Hardware-Komponenten angebracht, welche den Strom und die Spannung aufbereiten und damit die Aktoren ansteuern. Der Versuchsträger ist dabei als eine Regelschleife konzipiert.

Im Software-Modul werden dabei die Signale der Sensoren abwechselnd eingelesen. Die Sensoren sind dabei um 90° versetzt und ermöglichen dadurch die Messung der Verformung in zwei unabhängigen Raumrichtungen. Basierend auf den Messwerten werden diese zur Errechnung der Stellgrößen in den jeweiligen Raumrichtungen in Form eines Reglers ermittelt. Die Aktoren sind ebenfalls versetzt zueinander angeordnet, weswegen im Anschluss die benötigten Kraftanteile für die jeweiligen Aktoren ermittelt wird.

Weil der eingesetzte Mikrocontroller nicht in der Lage ist, direkt die Aktoren anzusteuern, muss der Spannungs- und der maximale Stromstärkepegel des ausgehenden Signals konditioniert werden. Dazu stehen mehrere elektronische Komponenten zur Verfügung. Dabei wird das analoge Signale, welches der Mikrocontroller zur Verfügung stellt, über eine Digital-Analog-Wandlung, in seiner Spannung angepasst. Anschließend wird über eine Pulsweitenmodulation dieses wieder digitalisiert und über einen Klasse-D-Verstärker die maximale Leistungsabgabe erhöht. Anschließend wird es weitergeleitet, wo es die Aktoren steuert. Die angebrachten Dehnmesssteifen ermitteln die Verformung, wobei das gemessene Signal über eine Analog-Digitalwandlung wieder dem Mikrocontroller zur Verfügung gestellt wird. Das aufgebaute Systeme wurde dabei in Betrieb genommen und erste Versuche durchgeführt. Dabei zeigte das System erste vielversprechende Ergebnisse und es wurden weitere Versuche durchgeführt. Durch eine Überspannung während der Versuchstätigkeiten wurden dabei mehrere elektronische Komponenten irreparabel beschädigt. Anfragen an Herstellern der Komponenten ergaben jedoch, dass Teile der beschädigten Komponenten nicht mehr hergestellt werden, weshalb eine Reparatur nicht möglich war. Daher wäre es notwendig gewesen, neue Bauteile zu identifizieren und den Prototypen erneut aufzubauen.

Ein weiteres Beispiel-CPS wurde bei Blum umgesetzt. Dieses stellt Messtaster dar, welche nun nichtmehr über Batterien versorgt werden und ihre Datenübertragung nicht mehr kontaktlos, sondern nunmehr kontaktierend vornehmen. Diese CPS sind in Abbildung 43 dargestellt.



Abbildung 43: Beispiel-CPS

AP 4.1: Aufbau der Demonstratorplattform

Nach Abschluss der vorgelagerten Untersuchungen und Test der Eigenschaften der einzelnen Komponenten ist die Spindel komplett finalisiert.

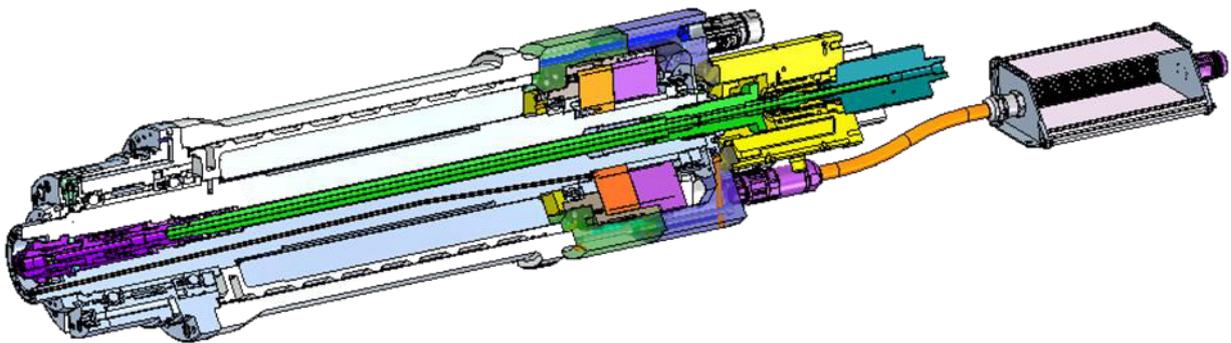


Abbildung 44: Endgültige Ausführung der BaZMod-Spindel

Alle Komponenten der Energie- und Datenschnittstelle sind integriert und funktionsfähig im Sinne erster Tests.

Als Testmaschine wird eine BA 422 von SW verwendet, welche über zwei in der Z-Achse unabhängige Spindeln verfügt.

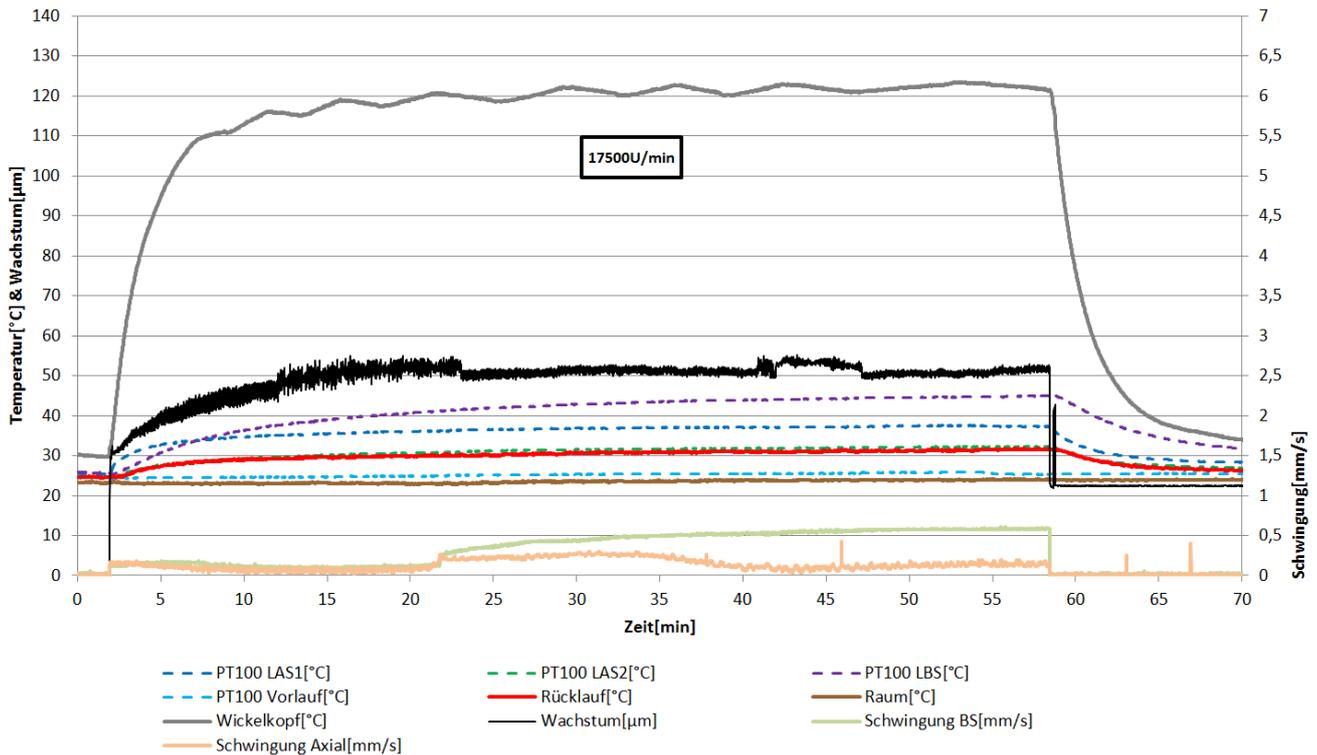


Abbildung 45: Spindeleigenschaften bei 17500 rpm



Abbildung 46: Fertige BaZMod-Spindel mit integrierter Daten- und Energieschnittstelle

Als Energie- und Datenschnittstelle zwischen Spindel und Werkzeug wurden Kontakt-Verbindungen entwickelt. Diese werden in den Standard-HSK eingebettet und sollen folgende Anforderungen erfüllen:

- Spannmöglichkeit von BaZMod-HSK auf BaZMod-Flansch
- Spannmöglichkeit von Standard-HSK auf BaZMod-Flansch
- Spannmöglichkeit von BaZMod-HSK auf Standard-Flansch
- Montage und Betrieb in nasser Umgebung
- Beständig gegen hohe Temperaturen, Ölen und Kühlschmierstoff
- Zulässiger Nennstrom von min. 12,5A
- Schwingungsfest

- Lange Lebensdauer auch bei hoher Werkzeugwechselintervalle

Eine weitere Herausforderung stellt der geringe Bauraum dar. Da dieser beim HSK63 am geringsten ist, wurde diese Variante für die Entwicklung gewählt. Nach verschiedenen Ansätzen und Versuchen wurde folgende Lösung priorisiert:

Spindelseitig sind plane Kontaktflächen mit Isolationshülse vorgesehen (siehe Abbildung 47). Vorteil der planen Ausführung ist, dass sich keine Späne-Partikel in Vertiefungen oder an hervorstehenden Komponenten ablagern können. Des Weiteren ermöglicht dies auch das Spannen von Standard-HSK Werkzeugen.

Da die Spannungsversorgung für CPS explizit von der Steuerung zugeschaltet werden muss, dürfen die Kontakte bei Einsatz von Standard-HSK Werkzeugen auch kurzgeschlossen sein – solange die Spannungsversorgung deaktiviert ist.

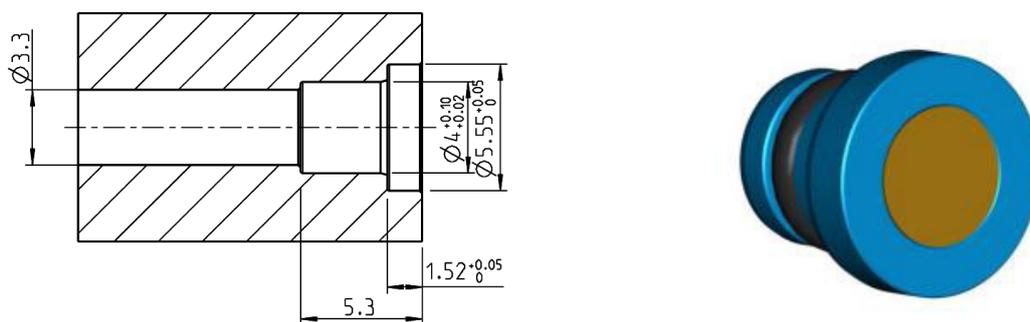


Abbildung 47: Spindelseitige Kontaktschnittstelle

Werkzeugseitig wurden Federkontakte mit einer elastischen überstehenden Isolationslippe entwickelt (siehe Abbildung 48). Die Isolationslippe wird im gespannten Zustand gegen die spindelseitige Hülse gepresst und nach außen deformiert. Dies dient zur Verdrängung und Isolation von Flüssigkeiten. Da Späne-Ablagerungen einen Kurzschluss verursachen könnten, empfiehlt es sich, die Werkzeugseitige Kontakt-Schnittstelle mit Kühlschmierstoff / Luft zu reinigen.

Um die Kontaktverbindung auch bei Vibrationen zu gewährleisten, wurde eine Feder hinter dem Kontaktpin positioniert. Die Federkonstante ist in Abhängigkeit der zu widerstehenden Vibration und zur gewünschten Lebensdauer zu wählen.

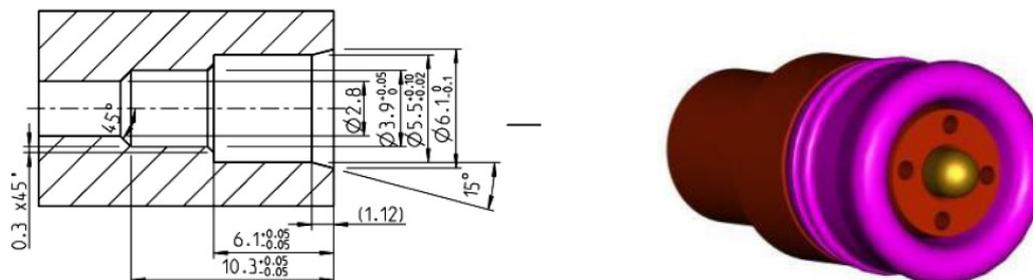


Abbildung 48: Werkzeugseitige Kontaktschnittstelle

AP 4.2: Hard- und Softwareintegration sowie Integration der Konfigurationsmethodik

Im Rahmen des AP 4.2 wurden die ersten Schritte zur Hardware-Integration durchgeführt. Verschiedene Varianten zur Spindelintegration wurden computertechnisch simuliert, die im nächsten Schritt der tatsächlichen Integration bei dem Projektpartner SW direkt einfließen. Abbildung 51 stellt den Zusammenbau der Spindeleinheit und des Schlittens dar. Die finale Integration der Baugruppe wird im Laufe des aktuellen AP bei SW erfolgen.

Bei der Systemintegration der einzelnen Komponenten in die BA 422 werden die Signalwege Hardware- und Softwaretechnisch definiert.

Die Hauptkommunikation der CPS Komponenten der Projektpartner zur Maschine erfolgt hauptsächlich über Peripherie-I/O. Die Kommunikation der U-Achssysteme ist mittels Profibus IRT realisiert.

Nachfolgend eine Übersicht der Signalwege des Gesamtsystems:

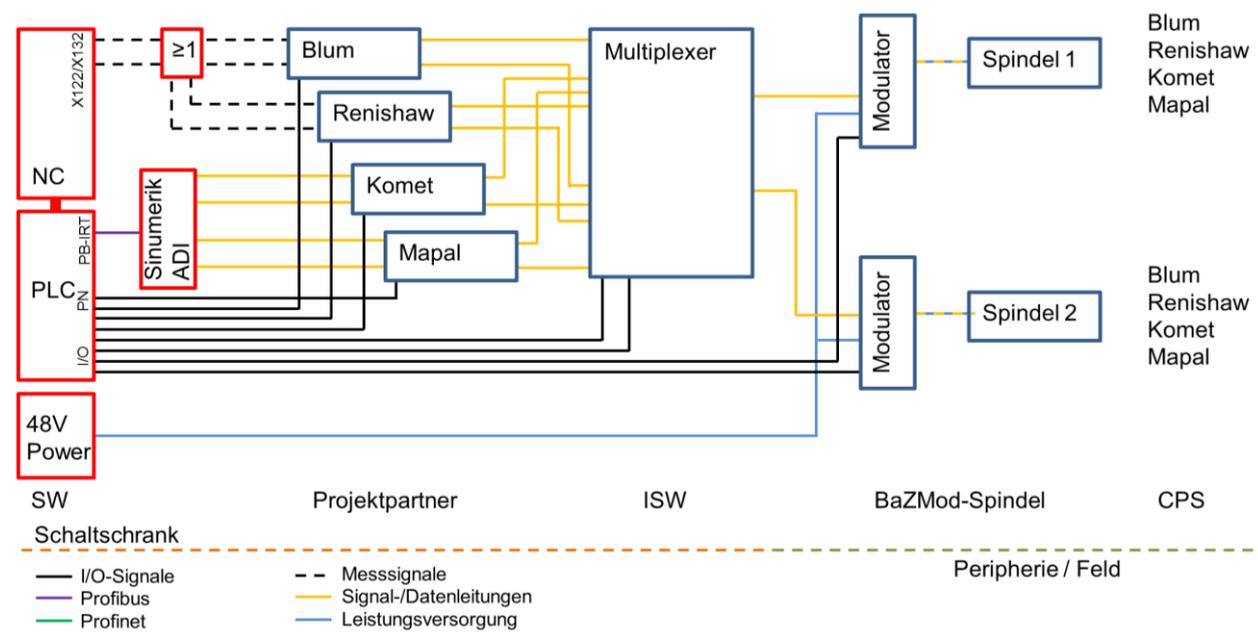


Abbildung 49: Systemübersicht der Signalwege

Abbildung 50 zeigt die Integration der zusätzlichen BaZMod-Komponenten in den Schaltschrank der Maschine BA 422.

Forschungsbericht

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

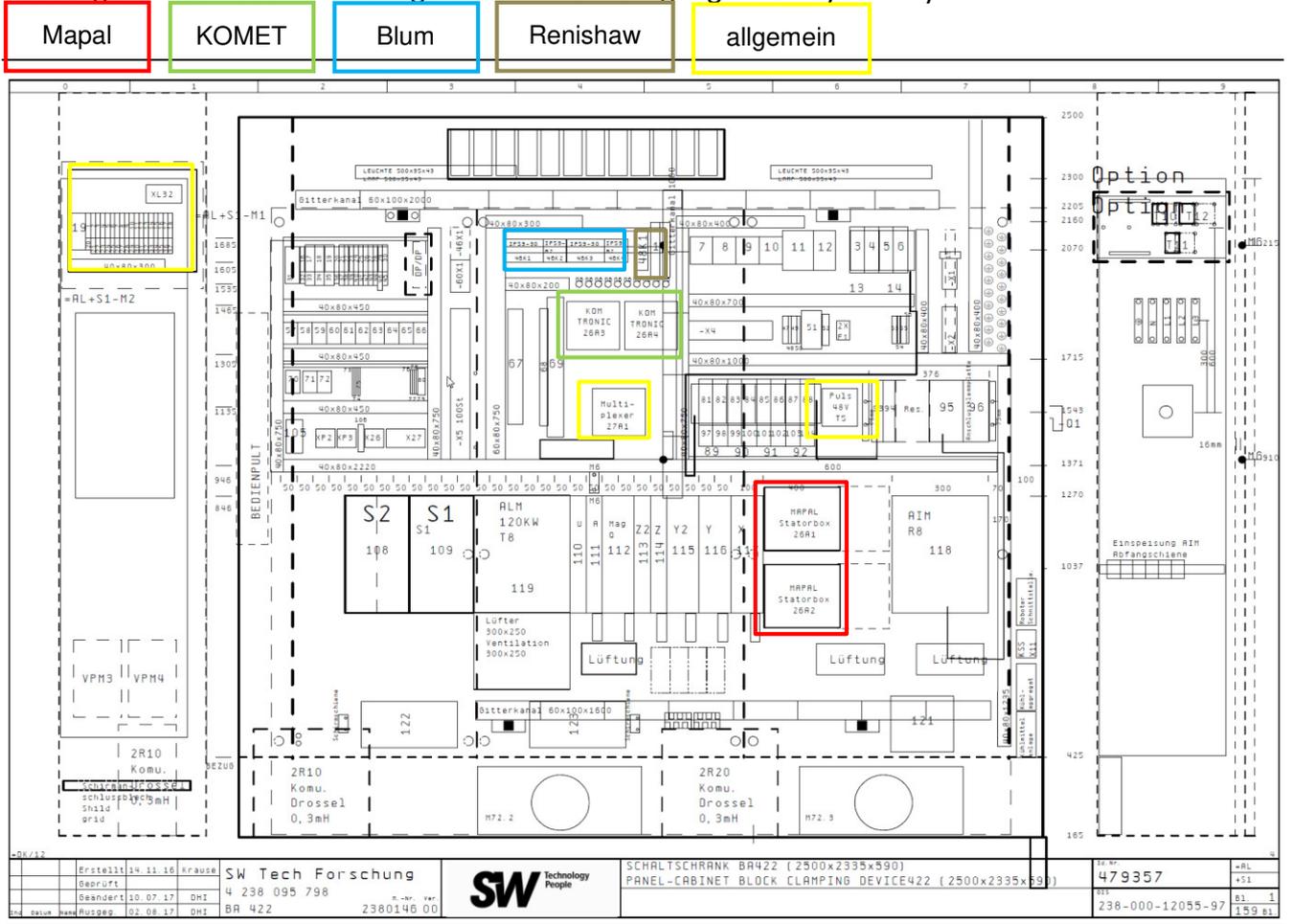


Abbildung 50: Schaltschrankaufbau

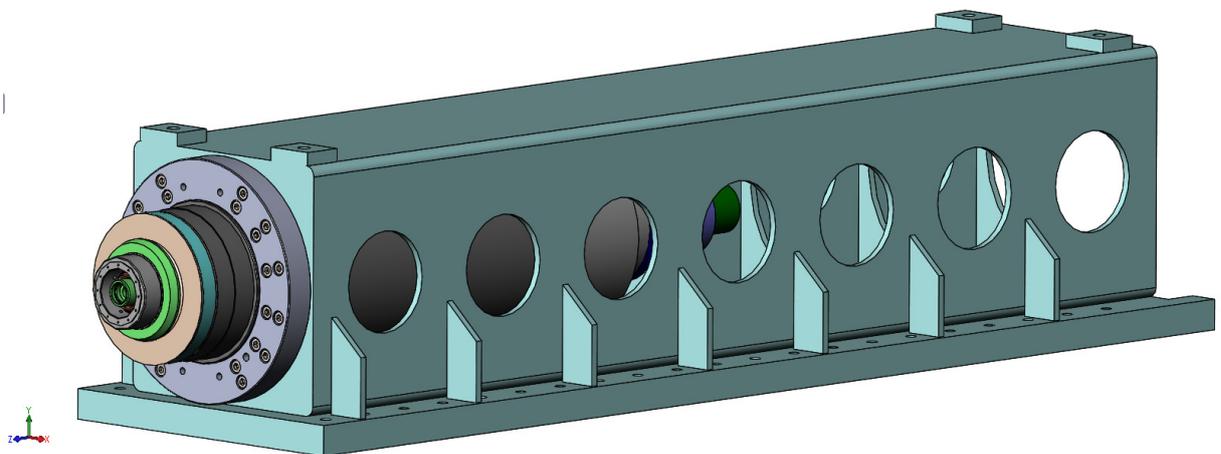


Abbildung 51: Simulation der Einbausituation der Spindeleinheit am IfW

AP 4.3: Systemtest und Optimierung

Im Rahmen des AP 4.3 wurden experimentelle Versuchsreihen an der Demonstratormaschine bei SW durchgeführt, um das dynamische Verhalten des Gesamtsystems zu untersuchen. Vor der Implementierung der BaZMod-Spindel wurde der Ist-Zustand der Maschine mit der Standardspindel ermittelt. Der Versuchsaufbau ist der Abbildung 52 zu entnehmen. Ein Beschleunigungsaufnehmer wurde auf dem vorderen Spindellager angebracht, um das Verhalten der rechten Spindel zu erfassen. Ein zweiter Beschleunigungsaufnehmer wurde auf dem Werkstück angebracht, um die Schwingungen während des Bearbeitungsprozesses aufzunehmen.



Abbildung 52: Demonstratormaschine Typ BA422 (links) mit applizierten Beschleunigungsaufnehmern im Bearbeitungsraum (rechts).

Leerlaufmessungen

Eventuelle Einflüsse von Hauptantrieben und Nebenaggregaten können mittels Leerlaufmessungen detektiert werden. Im Folgenden wird auf das Ergebnis aus dem durchgeführten Run-Up eingegangen. Abbildung 53 stellt die Beschleunigung in radialer Richtung am vorderen Spindellager dar. Die Messungen wurden in einem Drehzahlbereich von 500 bis 17.000 min^{-1} im Frequenzbereich bis 1,5 kHz durchgeführt.

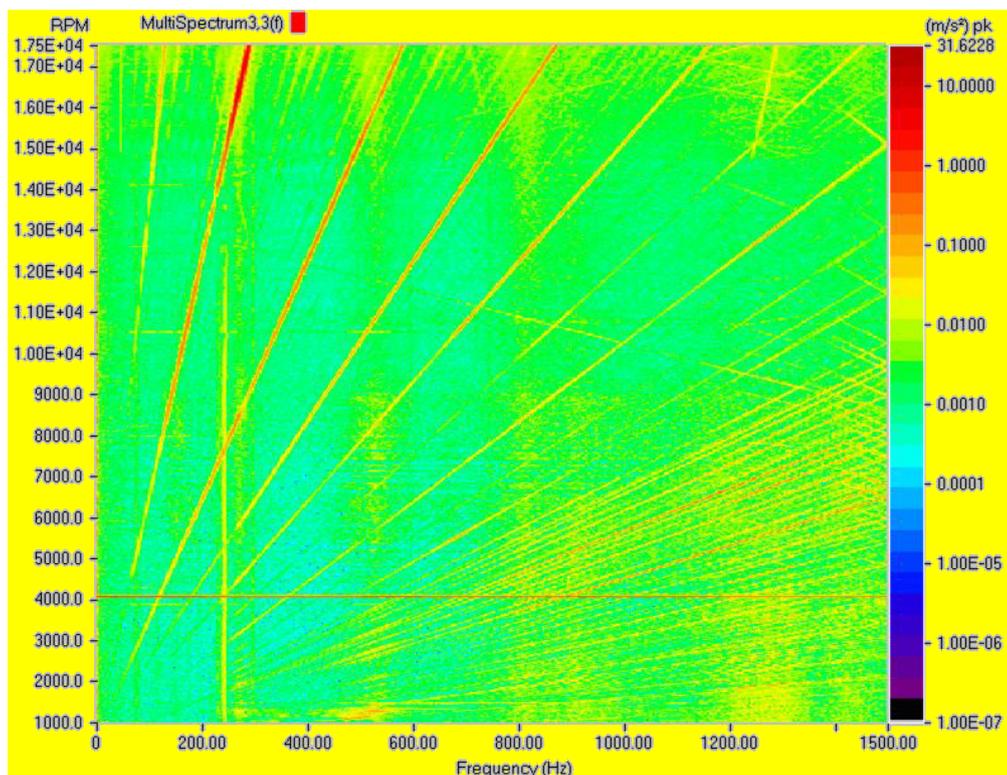


Abbildung 53: Run-Up der rechten Spindel

Auffällig ist die Amplitudenerhöhung bei 240 Hz, die vermutlich durch die Hydraulik hervorgerufen wird. Bei einer angenommenen Drehzahl der Pumpe von 1440 min^{-1} ergibt sich mit einer Zähnezah der Hydraulikpumpe von $z = 10$ eine Pumpengrundfrequenz von 240 Hz. Bei der Übereinstimmung der Pumpengrundfrequenz mit einer Spindeleigenfrequenz wie bei 15.000 min^{-1} werden unerwünschte Resonanzerscheinungen im System möglich.

Im Rahmen der Spindelabnahme bei Fa. Kessler wurde auch der Systemtest des Spannsystems durchgeführt. Einstellwerte an der Spann-Löseeinheit und dem Sensor wurden optimiert und dokumentiert. Die Spannkraft wurde gemessen und die Mediendurchführung Luft kontrolliert. Ebenso wurde die Spindel mit integriertem Spannsystem ausgewuchtet. Der endgültige Systemtest erfolgt nun aktuell im eingebauten Zustand in der Werkzeugmaschine.

Messungen unter Span

Ziel der Bearbeitungsversuche ist grundsätzliche Information über die Frequenzanteile im Spektrum während der Bearbeitung zu sammeln und diese bei dem Vergleich der Standardspindel mit der BaZMod-Spindel anzuwenden. Die Fräsversuche wurden mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Technologieparameter durchgeführt.

<i>Schnittgeschwindigkeit v_c</i>	<i>220 m/min</i>
<i>Vorschubgeschwindigkeit v_f</i>	<i>1213 mm/min</i>
<i>Zahnvorschub f_z</i>	<i>0,2 mm/Zahn</i>
<i>Schnitttiefe a_p</i>	<i>3 mm</i>

Tabelle 1: Technologieparameter für die Fräsversuche

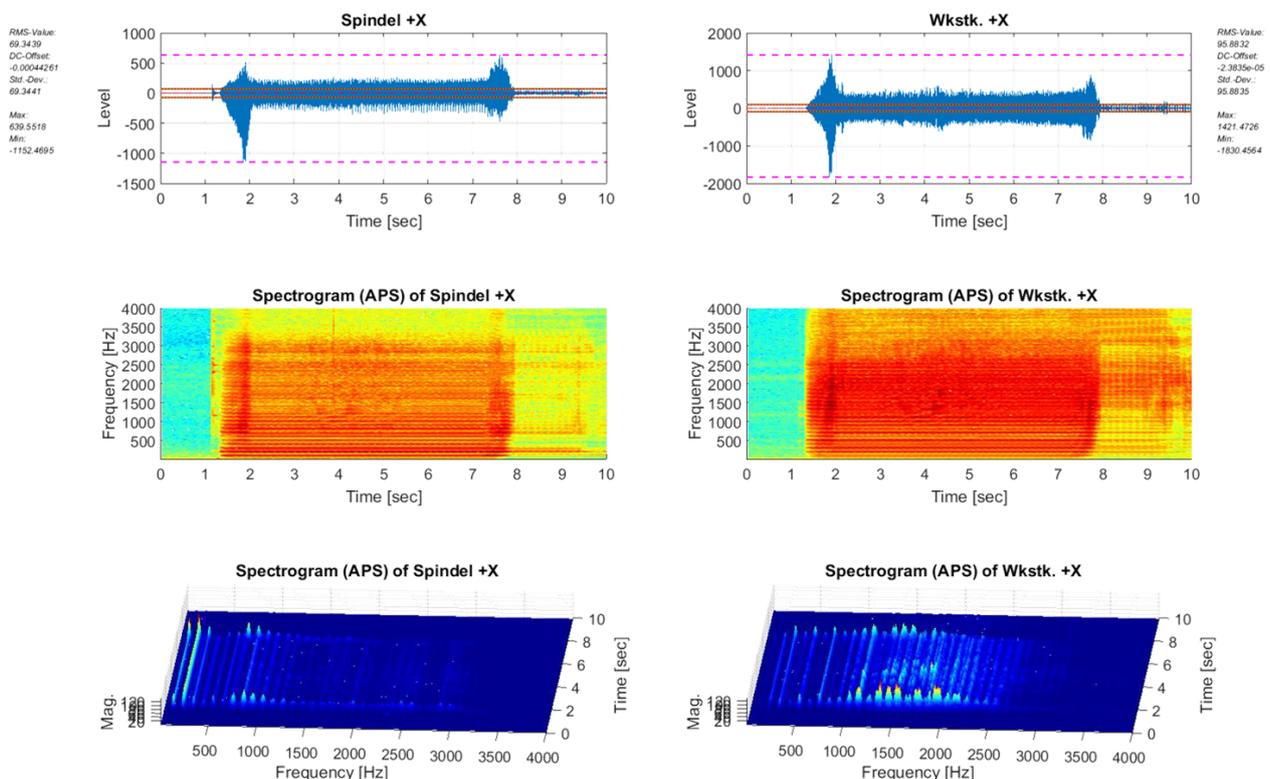


Abbildung 54: Exemplarische Darstellung in X-Richtung: Zeitsignale, Spektrogramme und Wasserfalldiagramme der Spindel (links) und des Werkstücks (rechts) beim Fräsen.

Abbildung 54 zeigt exemplarisch die aufgenommenen Zeitsignale, die Spektrogramme im Zeitbereich und daraus berechneten Wasserfalldiagramme im Frequenzbereich in X-Richtung für die Spindel (links) bzw. für das Werkstück (rechts). Aus den Wasserfalldiagrammen lässt sich vor allem die Zahneingriffsfrequenz $f_0 = 121,3$ Hz und mit ihren Harmonischen erkennen. Weitere Auffälligkeiten konnten nicht festgestellt werden.

5.5 AP 5: Validierung und Transfer

Die Firma Kessler plant, nach erfolgreichem Abschluss des Projektes, Spindeln in Zukunft mit dem im Projekt spezifizierten, prototypischen realisierten System auszurüsten.

Kessler ist es damit möglich, durch die Weiterentwicklung der Motorspindel in Bezug auf eine Datenschnittstelle, die stetig steigende Marktanforderung in Sinne der Prozessüberwachung und Prozessdokumentation zu erfüllen.

Durch die Projektteilnahme kann Kessler sich einen Zeitvorsprung in Bezug auf die Erfahrung mit dem im Projekt zu entwickelnden System schaffen.

Ökonomische Umsetzungschancen können aufgrund des heutigen Kenntnisstandes noch nicht abgeschätzt werden. Eine genaue Einschätzung ergibt sich nach Ablauf des Projektes aus den Kosten für einen serienmäßigen Daten- und Energieübertrager.

Im Rahmen des AP 5.1 und 5.2 wurden die ersten Vorbereitungen zur Standardisierung der neuen intelligenten HSK-Schnittstelle eingeleitet (DIN Ausschuss, das IfW ist hier vertreten durch Steffen Braun). In Form einer Erweiterung der bestehenden Normen (DIN 69893 und DIN 69063) soll die Kontaktanordnung auf der Planfläche der HSK-Schnittstelle normiert werden (siehe Abbildung 55). Für diesen Zweck wurde einen ersten Entwurf eines Normungsvorschlags ausgearbeitet (siehe Anhang).

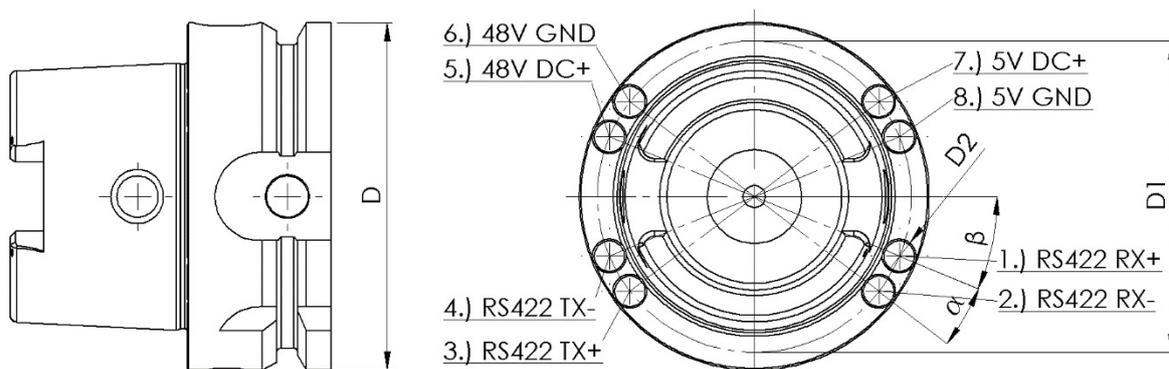


Abbildung 55: Anordnung der Kontakte auf der Planfläche

Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt BaZMod wurde auf dem Produktionsforschungskongress am 23. und 24. Juni 2016 in Berlin vorgestellt. Begleitet wurde der Kongress von einer Ausstellung (Themeninsel: Industrie 4.0: Intelligente Vernetzung in der Produktion), bei der die Standbetreuung von iwB und IfW übernommen wurde. Hierbei wurden mehrere Gespräche mit Interessenten aus der Industrie und Forschung durchgeführt, die zur weiteren Verbreitung der grundlegenden Projektziele beigetragen haben.

Forschungsbericht

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

Eine Präsentation des Projektes erfolgte außerdem bei drei Veranstaltungen der Reihe „Werkzeugmanagement mit Industrie 4.0“ am PTW in Darmstadt, zweimal durch das ISW, einmal durch Mapal.

Eine Präsentation des Projektes mittels Posterausstellungen und Austausch mit anderen Projekten zum Thema Industrie erfolgte auf den Koordinatorentreffen in Stuttgart und in Paderborn, sowie auf der Konferenz FAIM 2017 in Modena.

Für eine anschauliche Präsentation der im Projekt ausgearbeiteten Lösungen wurde außerdem ein Messedemonstrator aufgebaut, wie er in Abbildung 56 zu sehen ist. Zielausstellungen für den Demonstrator waren das Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium am 18./19.05.2017, die EMO 2017, die VDMA-Veranstaltung „Infotag Industrie 4.0 – Transfer aus der Forschung“ am 22.11.2017 sowie weitere noch nicht näher benannte Ausstellungen.

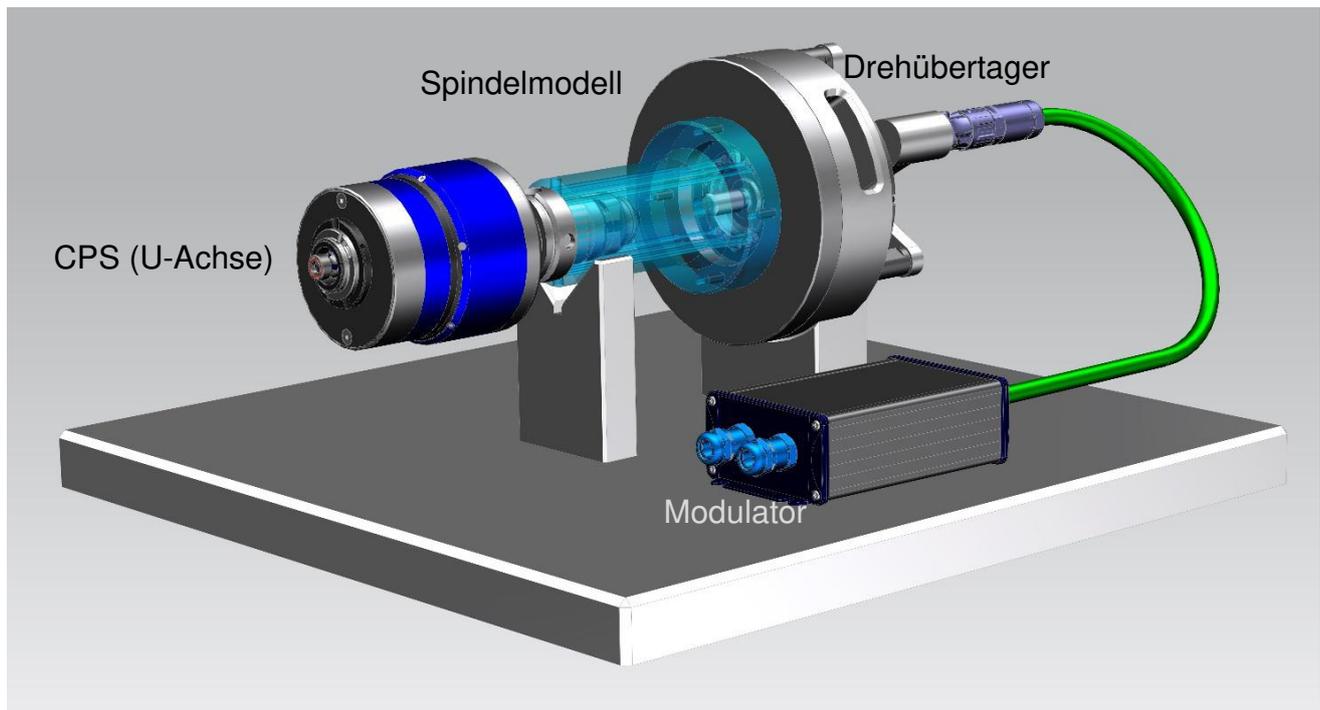


Abbildung 56: Demonstrator

Die Abschlusspräsentation des Projektes erfolgte durch einen Messeauftritt auf der EMO 2017 im Zeitraum vom 18.-23. September 2017 in Hannover. Auf der „mav industrie 4.0 area“ erhielten Besucher einen Einblick über das Projekt BaZMod. Mit der Ausstellung einer Werkzeugmaschine des Typs BA422 der Firma SW mit zwei integrierten BaZMod-Spindeln konnte dem Fachpublikum die Funktionsweise der Schnittstelle präsentiert werden. Durch regelmäßige Live-Demonstrationen wurde den Besuchern gezeigt, wie die BaZMod-Schnittstelle den Einsatz von Aussteuerwerkzeugen und Messmitteln deutlich vereinfacht. Zusätzlich wurden ein Spindeldemonstrator und der nachrüstbare Adapterflansch ausgestellt. Das Interesse an der neuen Schnittstelle war groß: Hersteller von Werkzeugmaschinen, Spindeln und Messmitteln möchten zukünftig die BaZMod-Schnittstelle einsetzen, um sowohl die Produktivität als auch die Flexibilität ihrer Produkte zu steigern.



Abbildung 57: BaZMod Messestand auf der EMO 2017

Veröffentlichungen aus dem Projektinhalt

- [1] Slavov, V.; Kimmelman, M.; Heisel, U.: Media, Data and Energy Transmission in Machine Tool Spindles: an FE Analysis of Implementation Possibilities, Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 794 (2015), S. 403-410
- [2] Slavov, V.; Kimmelman, M.; Stehle, T.: Versorgung von intelligenten Werkzeugen. wt Werkstattstechnik online 106 (2016) Nr. 1/2, S. 72–76, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [3] Vieler, H.; Lechler, A.: Intelligente Schnittstellen für intelligente Werkzeuge. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) Nr. 7/8, S. 520-524, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [4] Vieler, H.; Lechler, A.; Riedel, O.: Architecture and Implementation of an Interface for Intelligent Tools in Machine Tools. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy
- [5] Schmid, M.; Berger, S.; Rinck, P.; Fischbach, C.: Smarter statt schneller - Was bringen intelligente Werkzeuge? ZWF 109 (2014).

Vorträge

5. WGP-Kongress, 7.-8. September 2015 Hamburg: „Untersuchung der Erweiterungsmöglichkeiten von Werkzeugmaschinen spindeln hinsichtlich Medien-, Daten- und Energieübertragung mittels FEM“

Produktionsforschungskongress, Intelligente Vernetzung in der Produktion, 24. Juni 2016 Berlin: „Industrie 4.0 an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Maschine.“

Forum Industrie 4.0, EMO 2017, 19. September 2017 Hannover: „Industrie 4.0 an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Maschine.“

Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium, 19. Mai 2017 Aachen, „Robuste Produktionssysteme durch Sensorintegration“

5.6 Ergebnistransfer und Zusammenarbeit mit Verbundprojekten Industrie 4.0

An den beteiligten Forschungseinrichtungen wurde eine Vielzahl von Forschungsprojekten im Bereich der Industrie 4.0 gestartet, wie beispielsweise „Mittelstand 4.0“ und „Robin 4.0“. Ziel ist dabei, neben der Identifikation weiterer Use-Cases der Digitalisierung in der Produktion,

auch Vorgehensweisen zur Erreichung der Digitalisierung in produzierenden Unternehmen zu entwickeln. Die Ergebnisse des BaZMod-Projekts haben geholfen, die Herausforderungen dabei zu verstehen.

Außerdem gab es bei verschiedenen Veranstaltungen, beispielsweise bei Koordinatorentreffen oder bei der Veranstaltung „Werkzeugmanagement mit Industrie 4.0“ Austausch mit anderen „Industrie 4.0“-Projekten, welche spezielle Problemstellungen aus anderen Blickwinkeln betrachtet haben, was das Verständnis einiger Details deutlich verbesserte.

6 Verwertung der Ergebnisse

6.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

KOMET Group GmbH

KOMET als Hersteller von Präzisionswerkzeugen für die zerspanende Metallbearbeitung hat sich zur Aufgabe gestellt, aktorische und sensorische Werkzeuge (CPS) zur Marktreife fertig zu entwickeln und in Verbindung mit den Komponenten der anderen Projektpartner zu vermarkten. Zusätzlich wurde der notwendige Drehübertrager für die BaZMod-Spindel in Abstimmung mit allen Projektpartnern gemeinsam mit unserem Unterauftragnehmer TRIGGERION entwickelt. Der Drehübertrager soll ebenfalls vermarktet werden.

Die aktorischen/sensorischen Werkzeuge (als CPS) benötigen Hersteller von Präzisionswerkstücken, die mit hoher Genauigkeit komplett auf einer Maschine zerspanend hergestellt werden. Werkzeugmaschinenhersteller können sich mit der Integration der BaZMod – Komponenten und BaZMod-CPS Produktivitätsvorteile verschaffen und ihre Wettbewerbsfähigkeit auf den internationalen Märkten steigern.

Um die Aktor-Sensor-Werkzeuge von an der standardisierten Schnittstelle einsetzen zu können, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Werkzeugmaschinenhersteller, Spindel - und CPS-Hersteller notwendig. KOMET beabsichtigt, weiterhin vor allem mit den Firmen SW, Kessler und Trigerion zusammenzuarbeiten, um komplette Lösungen vermarkten zu können.

Es wird Folgegespräche mit Projektpartnern geben, mit dem Ziel, die weitere Vorgehensweise zur Gewinnung von ersten Industrieanwendern und die notwendigen Schritte zur Einsatzreife der Komponenten abzustimmen und voranzutreiben.

Im Rahmen der Entwicklung wurde ein Patent für den Aufbau des Rotors, der einen Teil des Drehübertragers darstellt, angemeldet. Dieses Patent gehört KOMET und soll gemeinsam von KOMET und Trigerion genutzt werden.

Durch die Vorteile der standardisierten Komponenten ergeben sich erhebliche Vorteile bei der Installation von CPS. Im Bearbeitungsraum der Maschine müssen keine Zusatzkomponenten montiert werden. Es können unterschiedliche CPS von unterschiedlichen Herstellern in die Spindel eingewechselt und betrieben werden. Damit wird der Einsatz von Zusatzkomponenten auf Werkzeugmaschinen flexibler, einfacher, kostengünstiger und herstellerunabhängiger. Dies steigert das Marktpotential von zerspanenden Werkzeugmaschinen im internationalen Wettbewerb.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist darin zu sehen, dass zusätzliche Bearbeitungsschritte auf der Werkzeugmaschine Anwendung finden werden, z.B. Beschriftung von Werkstücken.

Bei den aktorischen Werkzeugen (CPS) von KOMET sind Hauptaspekte eine höhere Bearbeitungsqualität und Fertigbearbeitung von Werkstücken auf einer Maschine.

Verwertungsrisiken bestehen vor allem in der organisatorisch notwendigen Abstimmung der beteiligten Partnerfirmen, die für eine erfolgreiche Vermarktung unabdingbar ist. Nur mit der weiteren Beteiligung der Partner für die Schlüsselkomponenten und Hinzugewinnung von weiteren Partnern kann die Vermarktung erfolgreich werden.

MAPAL Dr. Kress KG

MAPAL hat sich schon während des Projektes intensiv um die Gestaltung der elektrischen Kontakte an der Werkzeugschnitte bemüht. Die im Zeitraum des Projektes entstandene Lösung hat sich zwar bewährt, muss aber auch weiterhin verbessert werden, vor allem Kosten günstiger gestaltet werden. MAPAL möchte die Kontakte am Markt vertreiben und eine entsprechende technische Serienreife mit angemessenem Preis dafür erreichen.

Die aktorischen und sensorischen Werkzeuge von MAPAL sollen zukünftig mit BaZMod-Standard (HSKi) am Markt verfügbar sein. Notwendig dazu ist eine Weiterführung der Normierung der geometrischen sowie auch elektrischen Kenngrößen. Ebenso wichtig ist in diesem Zuge die Ausweitung der Festlegungen auf weitere Schnittstellen wie HSK100, HSK40 und evtl. auch SK Aufnahmen.

Der Nachrüstflansch kann in manchen Fällen eine gute Lösung darstellen um an bestehenden Spindeln Daten und Energie im Werkzeug verfügbar zu machen. Zweifelsohne wird aufgrund der Auskraglänge und des Gewichtes mit Einschränkungen zu rechnen sein. Es sind jedoch durchaus Szenarien denkbar, in denen sich der Einsatz lohnt. MAPAL möchte den Nachrüstflansch auch weiterhin herstellen und vertreiben um bei Bedarf eine Lösung für den Markt bereitstellen zu können.

Der bisherige MAPAL -Baukasten an mechatronischen Werkzeugen und Lösungen wird zukünftig um die neuen und zusätzlichen BaZMod- Komponenten erweitert werden. Dadurch kann MAPAL in diesem Bereich als Komplettzulieferer für Komponenten- und Maschinenhersteller Lösungen bieten. Dazu ist es notwendig mit den bisherigen Partnern weiterzuarbeiten um dieses Ziel gemeinsam zu verfolgen. Nur durch gemeinsame Anstrengungen kann eine wünschenswerte Marktdurchdringung und somit ein langfristiger Erfolg erreicht werden.

Blum-Novotest GmbH

Renishaw GmbH

SW - Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH

Durch die integrierte Übertragungsmöglichkeit von Daten und Energie vom Werkzeughalter über die rotierende Spindel hindurch ergeben sich viele Anwendungsfelder die standardisiert, bearbeitungsraum-neutral sowie herstellerunabhängig abgedeckt werden können.

Nicht nur der Einsatz bekannter U-Achssysteme zur Durchführung von Drehoperationen in einem Fräszentrum ist künftig ohne den störenden Stator möglich, sondern viele Anwendungen die Energie und Datenaustausch benötigen. Und dies mit einer standardisierten Schnittstelle.

Hierzu zählen beispielsweise aussteuerbare Werkzeuge zum Honen, einwechselbare Beschriftungswerkzeuge wie Laser oder Nadler, sowie intelligente Werkzeuge und Werkzeughalter die in der Lage sind Zustands- und Prozessdaten zu übermitteln und zu überwachen.

Die BaZMod-Spindel liefert somit einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung und Digitalisierung der spanenden Fertigung und eröffnet neue Technologiefelder auf einer SW Maschine.

Die Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH hat großes Interesse an der Weiterentwicklung und Serienreifmachung der vorliegenden Technologie.

Allerdings sehen wir ein nicht unwesentliches wirtschaftliches Risiko. Aktuell liegen die Kosten der BaZMod Komponenten am Beispiel eines U-Achssystems um 50% über den Kosten eines konventionellen U-Achssystems. Der Markt ist nicht bereit trotz der höheren Flexibilität Mehrkosten in dieser Höhe zu tragen.

Wenn diese Technologie als Standard etabliert werden soll, muss der Preis attraktiver gestaltet werden.

Franz Kessler GmbH

Die Standardisierung der Schnittstelle für Cyber-Physische Zusatzmodule in einem Normungsprozess bietet die Chance, in Zukunft eine einheitliche und schnelle Implementierung in einer Vielzahl von Werkzeugmaschinen und Spindelsystemen zu ermöglichen - unabhängig vom Fabrikat der NC-Steuerung, der Spindel oder des Werkzeugs/Zusatzmoduls. Dies vermittelt dem deutschen Werkzeugmaschinenbau einen Innovationsschub und festigt die Marktführerschaft deutscher Produkte im internationalen Wettbewerb.

Mit Hilfe eines nachrüstbaren Adapterflansches wird es möglich, auch bestehende Werkzeugmaschinen mit Cyber-Physischen Zusatzsystemen auszustatten. Auf diese Weise kann dazu beigetragen werden, eine variantenreiche Produktion in Deutschland zu halten und durch Prozessintegration und Erweiterung der Funktionalitäten von Bearbeitungszentren flexibel auf schnell wechselnde Erfordernisse reagieren zu können. Durch eine Standardisierung der Schnittstellen in einem Systembaukasten wird ein Hersteller-übergreifendes System geschaffen, aus dem eine nationale oder sogar internationale Norm für cyber-physische Zusatzsysteme entwickelt werden kann. Weiterführende, internationale Forschungsprojekte im EU-REKA-Umbrella PRO-FACTORY-Programm sind möglich.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist in der direkten Umsetzung der Projektergebnisse in den firmenspezifischen Produkten zu sehen. Konkret bedeutet dies:

Die direkte produkttechnische Umsetzung von standardisierten Lösungen im Werkzeug mit den Projektpartnern sowie weiteren Partnern, welche nach Projektabschluss oder bereits während der Projektlaufzeit gewonnen werden. Das gleiche gilt für, mit Sensoren und Messtechnik ausgestattete CPM. Dies erlaubt den verschiedenen Unternehmen ein neues Produktportfolio auf den Markt zu bringen.

- Die Möglichkeit der Anpassung bzw. Neuentwicklung von Zusatzmodulen für Hersteller, welche nicht im Projekt involviert waren, durch die Offenlegung der Schnittstellenstandards.
- Die Entwicklung neuer Cyber-Physischer Zusatzmodule mit zusätzlich integrierter Intelligenz (beispielsweise adaptive Rattererkennung und -vermeidung im Werkzeug).
- Die Integration der Schnittstelle in die eigens hergestellten Spindeln.
- Die produkttechnische Umsetzung des Adapterflansches.
- Die Integration der Spindeln und Adapterflansche in die Werkzeugmaschinen.
- Die Kosten- und Funktionsoptimierung, um die Produkte für die Anwender attraktiver zu machen.

Die Marktreife ist erreicht, wenn die Hard-und Software-Standardkomponenten entwickelt, produziert und erste Anwendungen im Einsatz sind. Der breitere Einsatz der standardisierten Lösungen mit cyberphysischen BaZMod-Zusatzaggregaten wird gelingen, wenn möglichst viele

Werkzeugmaschinenhersteller gewonnen werden, die die BaZMod-Spindeln mit der zugehörigen Hard- und Software-Peripherie einsetzen. Wenn dieses Stadium erreicht ist, werden auch andere Hersteller von Zusatzaggregaten dazu stoßen, denen die BaZMod-Schnittstelle erst den Einsatz in der Werkzeugmaschine auf relativ einfache Weise möglich macht. Allgemein bieten die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Verbundvorhabens den beteiligten Unternehmen die Möglichkeit künftige wirtschaftliche Anschlussprojekte zu realisieren.

Hainbuch GmbH

Hainbuch bekräftigt und schließt sich den Ausführungen von Fa. Kessler an.

Röhm GmbH

Die Etablierung der BaZMod-Schnittstelle bei Endkunden und Anwender, wie auch bei sämtlichen Maschinenherstellern ist nun die größte Aufgabe aller beteiligten Projektpartner. Dadurch ist der wirtschaftliche Erfolg des ganzen Projektes maßgeblich abhängig. Die Überzeugung, damit mit dieser Schnittstelle ein Mehrwert der Bearbeitung und des Prozesses erreicht werden kann, müssen nun alle Projektpartner aktiv auf dem Markt vertreten. Die Vorteile durch mehr Flexibilität, Prozessüberwachung und –steuerung im Hinblick auf Industrie 4.0 müssen hervorgehoben werden. Der Markt muss durch klare und fundierte Argumente überzeugt werden. Diese Aufgabe wird auch Röhm mit Nachdruck verfolgen, um die Verbreitung dieses System zu fördern.

Durch die Akzeptanz des Systems am Markt lassen sich hohe Stückzahlen generieren, welche wiederum die Stückkosten senken werden. Dies ist wiederum sehr wichtig, damit die Kunden das System überhaupt kaufen, denn der Mehrwert muss schlussendlich auch bezahlbar bleiben. Ebenso muss aber parallel noch die Serientauglichkeit der Einzelkomponenten erreicht werden, wie auch die Stückkosten durch eine intensive Produktionsoptimierung gesenkt werden. Hier ist sicherlich noch viel Potential vorhanden, welches aber zusätzliche Aufwendungen mit sich bringt.

Für Röhm bietet diese standardisierte Schnittstelle der Maschinenspindel die Möglichkeit, sämtliche Weiterentwicklungen zukünftiger Spannsysteme auf die neuen Herausforderungen und Möglichkeiten der Schnittstelle abzustimmen. Durch den standardisierten Einsatz einer Energie- und Datenübertragung in jeder Spindel bieten sich hier weitere Ansatzpunkte, um das Spannsystem mit Sensorik auszustatten. Die Prozesssicherheit und die Prozessüberwachung könnten hier signifikant verbessert werden. Ebenso konnten erste Erfahrungen bereits in einer Produktüberarbeitung der Spann-Löseinheit einfließen.

6.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

ISW

Wenngleich es keine direkten Folgeprojekte für BaZMod am ISW gibt, so fließen die Erkenntnisse, welche im Laufe des Projektes gewonnen werden konnten bereits in andere Projekte im Bereich der Vernetzung in der Produktion ein. Die vereinfachte Einbindung von Werkzeugen, welche mit Intelligenz ausgestattet sind, ermöglicht es, die Grenzen der Vernetzung in der Produktionstechnik weiter in Richtung Prozess zu verschieben.

Die im Projekt erarbeitete Schnittstelle, sowohl die Übertragung von Energie und Daten durch die Spindel, als auch die programmtechnische Verbindung der seriellen Schnittstelle mit dem Bussystem der Maschine und weiteren externen Geräten eröffnet völlig neue Möglichkeiten Messdaten im Betrieb einer Maschine aufzunehmen. Somit können unter anderem die Auswirkungen, welche eine Anpassung an der Werkzeugmaschinensteuerung auf den Bearbeitungsprozess hat, deutlich einfacher erfasst und beurteilt werden.

Forschungsbericht

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule

Positive Effekte ergeben sich auch für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Die Ergebnisse des Projektes BaZMod stellen ein sehr anschauliches und vor allem greifbares Beispiel für Vernetzung in der Produktionstechnik dar und können somit in Vorlesungen und Übungen genutzt werden, um Studenten an diese Thematik heranzuführen.

IfW

iwb

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ergeben sich für das *iwb* neue Forschungsfelder, die auf der BaZMod-Schnittstelle aufbauen. Zur dynamischen Regelung des Fräsprozesses soll die Schnittstelle genutzt werden, um möglichst prozessnah Messdaten aufzunehmen. Dazu soll Sensorik zur Kraft-, Temperatur- und Schwingungsmessung in einem intelligenten Werkzeughalter (Abbildung 56) integriert werden. Über die BaZMod-Schnittstelle können die Messdaten ohne Verzögerung an einen Prozessregler übertragen werden, der daraufhin die Prozessparameter entsprechend anpassen kann.

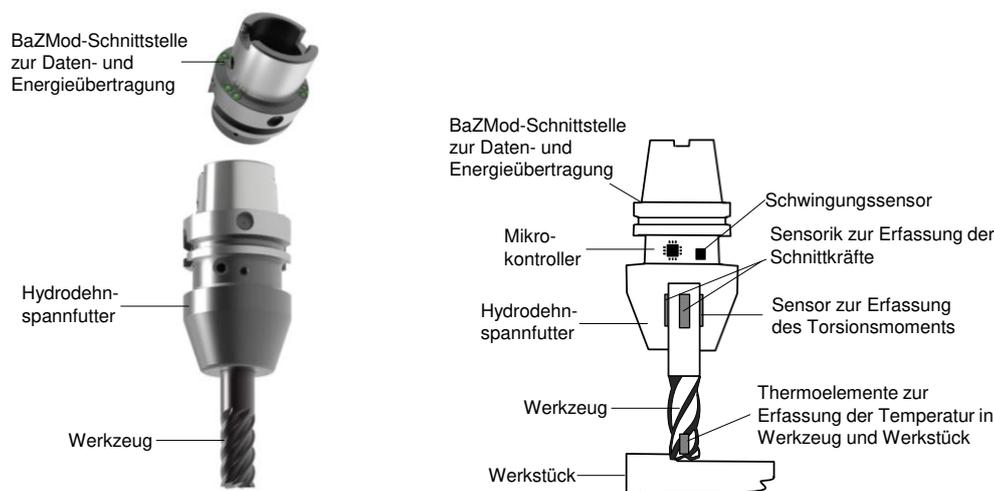


Abbildung 58: Sensorischer Werkzeughalter mit BaZMod-Schnittstelle

Gleichzeitig fließen die Ergebnisse in bestehende Forschungs- und Lehrprojekte mit ein. Im Bereich der Lehre sind dies insbesondere die am *iwb* betreuten Lehrveranstaltungen „Spannende Werkzeugmaschinen“, „Strukturverhalten von Werkzeugmaschinen“, „Werkzeugmaschinenpraktikum“, „Spannende Fertigungsverfahren“ und „Fertigungstechnologien“. Durch die Integration der Forschungsergebnisse in die Lehrinhalte wird bereits bei der Ausbildung der Studentinnen und Studenten der Ingenieur- und Betriebswissenschaften das Potenzial Cyber-Physischer Zusatzmodule näher gebracht.

IGCV

Neben den bereits gestarteten Projekten im Bereich Industrie 4.0 sollen auch noch weitere Forschungsaktivitäten im Bereich cyberphysische Zusatzmodule fortgeführt werden. Dabei werden Lebensmittelverarbeitungs- und Handhabungsmaschinen fokussiert, um somit flexibler und effizienter produzieren zu können.

7 Literatur

- [1] Schmidt, G.: Integrierte wirkstellennahe Kühlschmierstoffzufuhr, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 103 (2013) H. 1/2, Springer Verlag
- [2] Denk, J.; Wetzel, U.: Patentschrift EP2498347 A1, Anmeldenummer EP20110157265, Veröffentlichungsdatum 12. Sept. 2012, Eingetragen 8. März 2011, Siemens AG
- [3] Wulfsberg, J.P.; Verl, A.; Wurst, K.-H.; Grimske, S.; Batke, C.; Heinze, T.: Modularity in small machine tools, Springer 2013, 10.1007/s11740-013-0464-4
- [4] Kramer, C.: Offene Antriebsreglerplattform, Dissertation, Stuttgart, Just-Jetter Verlag 2011
- [5] Pritschow, G.; Sperling, W.; Müller, J.; Daniel, Ch.: OSACA – Auf dem Weg zur herstellerübergreifenden offenen Steuerung, Komponenten und Schnittstellen für offene Steuerungssysteme, S.7-27, München, Wien, Hanser Verlag 1996
- [6] Heisel, U.: Reconfigurable Manufacturing Systems, Manufacturing Technologies for Machines of the Future - 21st Century Technologies, Springer Verlag, 2003
- [7] Heisel, U.: Abschlussbericht Transferbereich 59 Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienproduktion, Transferprojekt T3, Stuttgart, 2008
- [8] Wurst, K.-H.: Conception of Reconfigurable Machining Systems – Design of Components and Controllers. Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Springer Verlag, 2005
- [9] Lorenzer, T.: Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen, Diss., VDI Verlag, Zürich, 2011
- [10] Lechler, A.: Flexible Reconfiguration and Maintenance Through Mechatronic Modules in Manufacturing Systems, IFPR 19th International Conference in Production Research, Valparaiso Chile, 2007
- [11] Hart, A. J.: Kinematic coupling interchangeability, Precision Engineering 28, 2004
- [12] Abele, E.: Mehrtechnologie orientierte rekonfigurierbare Werkzeugmaschine - Forschungsprojekt METEOR: Entwicklung und Industrietransfer, Darmstadt, 2007
- [13] Abel, M.: Start-up of Reconfigurable Production Machines with a Service-Oriented Architecture, 21st International Conference on Production Research, Stuttgart, 2011
- [14] Kircher, C.: Selbstadaptierende NC-Steuerung für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen, Diss., Jost-Jetter Verlag, Stuttgart, 2011
- [15] Kircher, C.: Self-Adapting Control Systems for RMS, CIRP-sponsored 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Michigan, 2005
- [16] OSACA Association: OSACA Handbook Version 2.0, Stuttgart, 2001
- [17] Pritschow, G.: Offene, echtzeitfähige Steuerungsarchitektur, Open Controller Enabled by an Advanced Real-Time Network, Werkstattstechnik online, 2003
- [18] Schmitz S.; Wurst K-H.; Lechler A.: Integrierte mechatronische Module für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme, IFM2007, Winterthur, Schweiz, 12.09.-13.09.2007

- [19] Schmitz, S.; Yang, D.; Wurst, K-H.: A new Communication System for Reconfigurable Mechatronic Modules, 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Massey University, Auckland, New Zealand 2 - 4 December 2008
- [20] Heisel, U.; Schleich, B.: Evaluation Method for Assessment of Maintainability in the Planning Stage. In: Proceedings of the 1st CIRP-International Seminar on Assembly Systems, 15.-17. November 2006, Stuttgart.
- [21] Heisel, U.; Rothmund, J.; Jakob, P., Böhm, T.: Spindelmodell zur dynamischen FEM-Simulation. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 4/2011 Mai, 106. Jahrgang, Carl Hanser Verlag, München, S. 245-248
- [22] Zäh, M. F.; Wiedenmann, R.: Systemtechnik zum laserunterstützten Fräsen, ZWF 106. Jg., 2011, Nr. 07/08, S. 506-509
- [23] Gebhard, P.; Zäh, M. F.: Empirical Model for the Tool Shoulder Temperature during Friction Stir Welding, 6th international Symposium on Friction Stir Welding, Saint-Sauveur, Canada, 10.10-13.10.2006

8 Anhang

Normungsantrag zur Standardisierung der BaZMod-Schnittstelle HSK-i

1. Vorwort

Um das Bearbeitungsspektrum in modernen Bearbeitungszentren zu erweitern, werden vermehrt intelligente Werkzeuge (Cyber-Physische Module, CPM) eingesetzt, die eine zusätzliche Versorgung von Daten, Energie oder Medien benötigen. Eine Integration von Übertragungselementen in die Werkzeugspindel und die Kegel-Hohlschaft Werkzeugaufnahme (HSK) soll eine Übertragung dieser Größen durch die Schnittstelle Maschine/Werkzeug ermöglichen. So soll ein Standard geschaffen werden, welcher die Anbindung von intelligenten Werkzeugen bzw. CPM herstellerunabhängig realisieren lässt. Im Rahmen des BaZMod-Projektes wurde die bestehende HSK-Schnittstelle um Kontakte auf der Planfläche zur Daten- und Energieübertragung erweitert.

2. Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Normungsantrags ist die Festlegung der Kontaktanordnung auf der Planfläche der HSK-Schnittstelle. Dies soll in Form einer Erweiterung der bestehenden Normen (DIN 69893 u. DIN 69063) realisiert werden. Die Norm DIN 69893 legt die Maße für Kegel-Hohlschäfte mit Plananlage (HSK) für Werkzeugmaschinen fest. Die Norm DIN 69063 legt für die Schnittstelle Maschine/Werkzeug die maschinenseitigen Anschlussmaße zur Aufnahme von Kegel-Hohlschäften nach DIN 69893-1 fest.

3. Kontaktierung

Die elektrische Verbindung zwischen wechselbarem CPM und rotierendem Teil des Drehübertragers erfolgt über Kontakte an der Planfläche der HSK-Schnittstelle. Die Kontakte sind auf der Werkzeugseite federnd, auf der Spindelseite plan ausgeführt. Die Kontaktstelle ist nach außen hin abgedichtet, so dass im gespannten Zustand die Schutzklasse IP67 eingehalten wird. Es sind 8 Kontakte vorgesehen:

1. RX+
2. RX-
3. TX+
4. TX-
5. 48 V
6. GND (48 V)
7. 5 V
8. GND (5 V)

Jeweils zwei Kontaktpaare sind für die bidirektionale Datenübertragung (Kontakte 1-4) sowie jeweils zwei Kontaktpaare mit separatem Ground für Stromversorgung von CPM (48 V, Kontakte 5, 6) und (5 V, Kontakte 7, 8) reserviert.

Die Kontakte sind rotationssymmetrisch auf der Planfläche angeordnet. Die Anordnung ist so gestaltet, dass bisher verwendete Flächen (beispielsweise pneumatische Plananlagenkontrolle) frei bleiben. Durch die Anordnung auf der Planfläche kann eine eventuelle KSS-Versorgung durch die Zentralbohrung weiterhin bereitgestellt werden. Eine fertigungsreife Version

der Kontaktanordnung ist der Abbildung 59 zu entnehmen. Die Spindelseite ist analog ausgeführt.

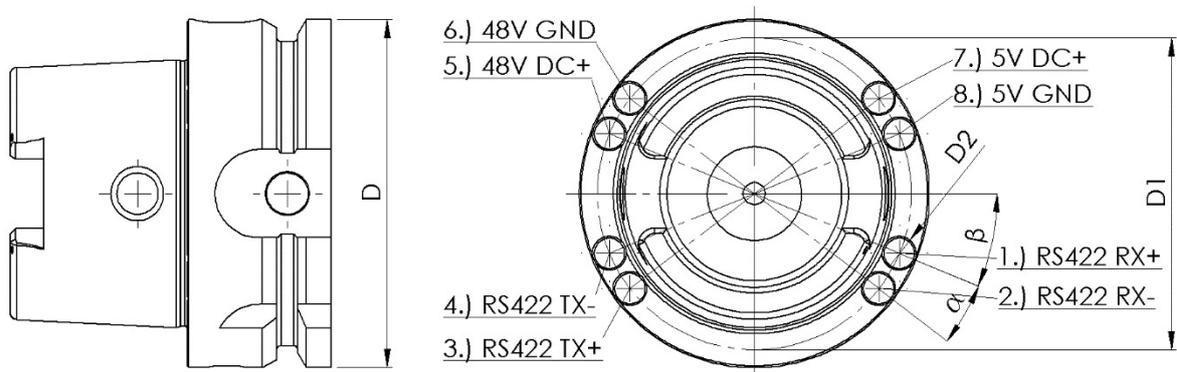


Abbildung 59: Anordnung der Kontakte auf der Planfläche

4: Maße

Tabelle 1 stellt die Geometrie der Kontaktanordnung auf der Planfläche des HSK dar.

Tabelle 2: Kontaktanordnung auf der Planfläche - Maße in Millimeter

<i>Parameter</i>	<i>Maß [mm, °]</i>	<i>Toleranzfeld</i>
<i>D</i>	63	-
<i>D1</i>	56,5	±0,1
<i>D2</i>	6,1	-
<i>α</i>	15°	-
<i>β</i>	22°30′	-

Genehmigung / Freigabe der Kooperationspartner im Projekt BaZMod

Hiermit bestätigen die Kooperationspartner, dass die Inhalte des Normungsantrags von einer Patentanmeldung ausgeschlossen sind und Sie mit der Einreichung des vorliegenden Antrags beim DIN einverstanden sind.

Kooperationspartner	Datum	Name	Unterschrift(en)
Blum-Novotest GmbH Kaufstraße 14, 88287 Ravensburg-Grünkraut			
Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg			
Hainbuch GmbH Erdmannhäuser Straße 57, 71672 Marbach			
IFW Institut für Werkzeugmaschinen Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart			
ISW Institut der Steuerungstechnik für Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart			
iwb Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften Boltzmannstraße 15, 85748 Garching			
Franz Kessler GmbH Franz-Kessler-Str. 2, 88422 Bad Buchau			
KOMET Group GmbH Zeppelinstraße 3, 74354 Besigheim			
Mapal Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG Obere Bahnhofstraße 13, 73431 Aalen			
Renishaw GmbH Karl-Benz-Straße 12, 72127 Pliezhausen			
Röhm GmbH Heinrich-Röhm-Straße 50, 89567 Sontheim/Brenz			
SW – Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH Seedorfer Straße 91, 78713 Waldmössingen			
Trigerion UG Brenntenstr.30, 78532 Tuttlingen			