

Klimaneutrale Energieversorgungskonzepte für ein Forschungsgebäude in Leichtbauweise

Sven Stark, Dominik Bestenlehner, Harald Drück

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart

Tel.: 0711-685-63253, Fax: 0711-685-63503

E-Mail: sven.stark@igte.uni-stuttgart.de

Internet: www.igte.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

Im aktuellen Klimaschutzgesetz hat sich das Land Baden-Württemberg zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 eine sogenannte Netto-Treibhausgasneutralität für alle Landeseinrichtungen zu erreichen, wozu auch die Universität Stuttgart mit ihrem Campus in Stuttgart-Vaihingen zählt. Das aktuelle Forschungsvorhaben „CampUS hoch i – CampUS intelligent gemacht“ unterstützt die Universität Stuttgart auf dem Weg zur Klimaneutralität, indem anhand von ausgewählten Gebäuden auf dem Campus Vaihingen exemplarisch Möglichkeiten für einen klimaneutralen Campus analysiert und demonstriert werden. Das als "Reallabor" konzipierte Vorhaben setzt dabei auf einen transdisziplinären Ansatz und die Partizipation der vielfältigen Interessensgruppen an der Universität im Rahmen unterschiedlicher Beteiligungsformate.

Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes ist die Fragestellung wie Klima- bzw. Treibhausgasneutralität sowohl in neu zu errichtenden als auch in zu sanierenden Gebäuden einschließlich deren Quartierseinbindung durch intelligente Technologien und innovative Ansätze erreicht werden kann. Anhand von zwei Bestandsgebäuden und zwei Neubauten auf dem Campus Vaihingen soll dies demonstriert werden. Durch die unterschiedliche Charakteristik der Gebäude, beispielsweise in Bezug auf deren Wärmedämmstandard, thermische Kapazität und Nutzung, wird ein hohes Maß an Übertragbarkeit der Projektergebnisse auch auf andere (außer-)universitäre Gebäude- und Quartiersstrukturen erwartet.

Gegenstand dieses Beitrages ist die Erarbeitung von klimaneutralen Energieversorgungskonzepten für den geplanten Neubau eines Laborgebäudes, welches in Leichtbauweise errichtet werden soll. Hierzu wurden zunächst die wesentlichen Eigenschaften und Randbedingungen des geplanten Neubaus an sich sowie bzgl. der Energieversorgung des Campus Stuttgart-Vaihingen ermittelt. Im Anschluss daran wurde eine erste Abschätzung der zukünftigen Energiebedarfe für Strom, Wärme und Kälte vorgenommen. Für einige ausgewählte Energieerzeugungstechnologien wie z. B. Solarthermie (ST), Photovoltaik (PV) oder Photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT) wurden erste Ertragsabschätzungen diesen Bedarfen gegenübergestellt. Basierend auf den genannten Abschätzungen und Randbedingungen wurden schließlich in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern sowie mit an der

Planung des Neubaus beteiligten Partnern mehrere (klimaneutrale) Energieversorgungskonzepte erarbeitet.

Bzgl. der Fragestellung wie Klimaneutralität im hier beschriebenen Forschungsprojekt definiert ist, wird zum einen auf einen Beitrag zur Definition unterschiedlicher Ansätze für Klimaneutralität [1] verwiesen. Zum anderen ist die Diskussion dieser Fragestellung Teil der laufenden partizipativen Aktivitäten des Forschungsprojektes. Hierzu wurde beispielsweise eine Umfrage unter den Studierenden und Mitarbeitenden der Universität Stuttgart durchgeführt, in welcher verschiedene Ansätze für Klimaneutralität bewertet, aber auch eigene Meinungen und Gedanken durch die Teilnehmer der Umfrage eingebracht wurden [2].

2. Randbedingungen

2.1 Randbedingungen für den geplanten Neubau

Der in diesem Beitrag betrachtete geplante Neubau ist ein Gebäude des Exzellenzclusters IntCDC (Integrative Computational Design and Construction for Architecture) [3] und soll sowohl Forschungsobjekt und -demonstrator als auch Forschungsplattform für integratives Planen und Bauen, neuartige Prozesse der Vorfertigung und des Bauens vor Ort sowie der damit einhergehenden Entstehung intelligenter und nachhaltiger Bausysteme sein. Für den Aufbau des Gebäudes sind Konstruktionen und Elemente aus verschiedenen Forschungsbereichen angedacht, wie z. B. mehrgeschossiger Holzbau, Biokomposit-Fassadenpaneele oder auch der Einsatz von neuartigen Betonen und Faserverbundelementen für weitgespannte Dachkonstruktionen. Das Raumkonzept sieht eine starke Vernetzung von Büro- und Laborflächen verbunden mit räumlicher Wandlungsfähigkeit vor und soll somit eine hohe Anpassungsfähigkeit an die sich verändernden Herausforderungen des Forschungsclusters IntCDC ermöglichen.

Derzeit (Stand: Februar 2022) befindet sich die Realisierung des Neubaus am Ende von Leistungsphase 2 (Vorplanung) nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [4]. Die Bauausführung ist für die Jahre 2024/2025 geplant. Neben den verschiedenen Akteuren der Planung ist das Projekt „CampUS hoch i“ als Impulsgeber für die Realisierung klimaneutraler Universitätsgebäude und in diesem Zusammenhang insbesondere bei der Erarbeitung von Energieversorgungskonzepten in das Bauprojekt involviert.

Entsprechend den vorliegenden Vorentwürfen des Gebäudes wird dieses eine Grundfläche von ca. 90 m x 30 m haben und 3 Stockwerke aufweisen. Die Nutzungsanforderung (NAF) listet Nutzflächen von insgesamt ca. 6.500 m² auf, wobei hiervon ca. 2.700 m² auf außenliegende Laborflächen entfallen. Im Gebäude selbst befinden sich verschiedene Werkstätten für Holz- und Metallbearbeitung, Elektrotechnik und Faserverbund sowie Laborflächen der Forschungsplattform, z. B. für Holzkonstruktionen, Faserverbundtechnologien und Robotik. Des Weiteren sind in dem Gebäude verschiedene Büroflächen mit Einzel- und Großraumbüros und Besprechungsräumen sowie diverse Flächen für den Gebäudebetrieb, ein Serverraum sowie Umkleide- und Duschräume vorgesehen.

Erste geotechnische Untersuchungen ergaben eine grundsätzliche Eignung des Untergrundes für Erdwärmesondenbohrungen bis zu einer Tiefe von ca. 120 - 130 m. Erdwärmesonden könnten entweder im Grundriss des Neubaus oder in den Außenflächen positioniert werden, mit Ausnahme im Bereich eines das Gelände kreuzenden S-Bahntunnels.

2.2 Randbedingungen für den Campus Stuttgart-Vaihingen

Nahezu sämtliche Universitätsgebäude auf dem Campus Stuttgart-Vaihingen sowie weitere Drittverbraucher wie z. B. Gebäude der Fraunhofer-Gesellschaft und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sind sowohl an ein Wärmenetz als auch an ein Kältenetz angeschlossen, welche von einem zentralen, universitäts-eigenen Heizkraftwerk (HKW) mittels verschiedener GuD- und KWK-Anlagen sowie Kompressions-Kälteanlagen mit Wärme bzw. Kälte versorgt werden. Der vom Heizkraftwerk erzeugte Strom deckt die von den Verbrauchern benötigte elektrische Energie nur zu etwa 40 %, weshalb der Großteil des Stroms zugekauft werden muss. Insgesamt beträgt der Energieverbrauch im betrachteten Versorgungsgebiet jährlich ca. 118 GWh Strom, 122 GWh Wärme und 46 GWh Kälte (Zahlen für 2019) [5].

Das Heizkraftwerk mit seinen verschiedenen Anlagen der Strom-, Wärme, Kälte- und Dampferzeugung wird fast ausschließlich mit Erdgas und nur zu einem sehr geringen Teil mit Heizöl betrieben. Der zugekaufte Strom ist Ökostrom. PV-Anlagen auf einigen wenigen Gebäuden des Campus tragen bisher mit vernachlässigbarem Anteil (< 0,1 %) zur Deckung des Strombedarfs bei [6].

Bei der Erarbeitung von klimaneutralen Energieversorgungskonzepten für den geplanten Neubau des IntCDC-Forschungsgebäudes stellt sich die Frage, welcher Anteil des Strom-, Wärme- und Kältebedarfs durch Flächen und Erzeuger am bzw. im Gebäude selbst gedeckt werden soll und kann und welcher Anteil durch das Heizkraftwerk als zentralem Energieerzeuger für sämtliche Gebäude auf dem Campusgelände übernommen wird. Durch den derzeitigen Einsatz von Erdgas als Brennstoff für das Heizkraftwerk und die damit verbundenen Emissionsfaktoren für Strom, Wärme und Kälte gestaltet sich die Realisierung eines klimaneutralen Gebäudes bei einer Versorgung durch das Heizkraftwerk schwierig. Möglicherweise muss hier zukünftig eine Umstellung der Brennstoff-Versorgung des Heizkraftwerks von konventionellem Erdgas hin zu auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas erfolgen. Aber auch angesichts begrenzter Flächen für z. B. Solarthermie und Photovoltaik auf und am Gebäude ist eine klimaneutrale Energieversorgung des Gebäudes eine Herausforderung. Eine klimaneutrale Energieversorgung des neuen Gebäudes erfordert daher jedenfalls die Betrachtung auf Quartiersebene (Campus) sowie gegebenenfalls auch darüberhinausgehende Maßnahmen wie die Kompensation von Treibhausgas-Emissionen.

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung des Campus Stuttgart-Vaihingen ist des Weiteren zu erwähnen, dass durch die geplante Erweiterung des Höchstleistungsrechenzentrums (HLRS) südlich des Campusgeländes voraussichtlich Niedertemperatur-Abwärme in der Größenordnung > 10 MW zur Verfügung stehen wird. Möglicherweise kann diese zusammen mit der Umgestaltung des Campus-

Wärmenetzes in ein Niedertemperatur-Wärmenetz für die Wärmeversorgung des Campus oder zumindest von Teilen des Campus genutzt werden. Derzeit ist jedoch noch völlig offen, wofür die HLRS-Abwärme genutzt wird und inwieweit eine Umgestaltung des Wärmenetzes erfolgen soll [6].

3. Energiebedarfsabschätzungen

3.1 Vorbemerkungen

Aufgrund des noch frühen Planungsstandes des Gebäudes konnte nur eine erste, grobe Bedarfsabschätzung vorgenommen werden. Wesentliche Informationen wie z. B. zur Gestaltung der Gebäudehülle, dem Anteil von Fensterflächen in der Fassade, den Raumaufteilungen, der Maschinennutzung, etc. lagen noch nicht vor. Eine Abschätzung der Bedarfe für Strom, Wärme und Kälte wurde daher im Wesentlichen über folgende zwei Ansätze vorgenommen:

- anhand von in der Literatur publizierten flächenspezifischen Bedarfswerten für verschiedene Nutzungseinheiten in Nichtwohngebäuden [7] und den aus der Nutzungsanforderung (NAF) bekannten unterschiedlichen Nutzflächen,
- anhand von historischen Messdaten von Gebäuden auf dem Campus Stuttgart-Vaihingen mit vergleichbarer Nutzung.

Aufgrund unterschiedlicher Energieaufwandsklassen beim ersten Ansatz und unterschiedlicher in Betracht gezogener Vergleichsgebäude beim zweiten Ansatz ergeben sich letztlich sehr große Unsicherheiten in Bezug auf die prognostizierten Energiebedarfe. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Bedarfe eingegangen und erläutert, welcher Jahresbedarf für die Erarbeitung der Energieversorgungskonzepte jeweils angenommen wurde.

3.2 Strombedarf

Ein wesentlicher Teil des Strombedarfs wird durch die Maschinen und Anlagen der verschiedenen Forschungsplattformen und Werkstätten im Gebäude erwartet, wobei der genaue Umfang des Maschinenparks, die jeweiligen Anschlussleistungen der einzelnen Maschinen und vor allem deren Betriebszeiten nur zum Teil bekannt sind. Des Weiteren ergibt sich ein Bedarf an elektrischer Energie für Beleuchtung und technische Geräte in den Büro- und sonstigen Räumen und in voraussichtlich eher geringem Umfang auch für die maschinelle Lüftungstechnik. Insgesamt wurde in dieser ersten Energiebedarfsabschätzung von einem Strombedarf von **500 MWh/a** ausgegangen.

3.3 Wärmebedarf

Der Bedarf an Trinkwarmwasser wird als gering eingeschätzt und resultiert beispielsweise aus benötigtem Warmwasser für Duschen oder zum Teil auch in den Labor- und Werkstattbereichen. Der Heizwärmebedarf ist aufgrund der noch unbekanntem Gebäudekonstruktion und vor allem -hülle schwierig abzuschätzen.

Anhand der oben genannten Ansätze wurde von einem gesamten Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser von **200 MWh/a** ausgegangen, wobei ca. 75 % auf Heizwärme und 25 % auf Trinkwarmwasser entfallen. Bzgl. des Temperaturniveaus der Heizung wird davon ausgegangen, dass ein Niedertemperatur-Heizsystem Verwendung findet.

3.4 Kältebedarf

Ein Großteil des Kühlbedarfs wird durch die Kühlung eines Serverraumes erwartet. Laut NAF ist auch für einige ausgewählte Räume, wie z. B. einen Besprechungs- und einen Konferenzraum, eine Kühlung vorgesehen. Des Weiteren besteht mutmaßlicher Kühlbedarf für einige der Maschinen in den Labor- und Werkstattbereichen. Insgesamt wurde in dieser ersten Energiebedarfsabschätzung von einem Kältebedarf von **100 MWh/a** ausgegangen. Die Temperaturniveaus der Kälteverbraucher wurden bei dieser ersten Abschätzung noch nicht näher betrachtet.

3.5 Saisonalität der Bedarfe

Nach der Grobabschätzung der jährlichen Energiebedarfe wurde anhand der vorliegenden Informationen zu den wesentlichen Verbrauchern eine Abschätzung des saisonalen Verlaufs vorgenommen. Abbildung 1 zeigt die angenommene monatliche Verteilung für die jeweiligen Energiebedarfe.

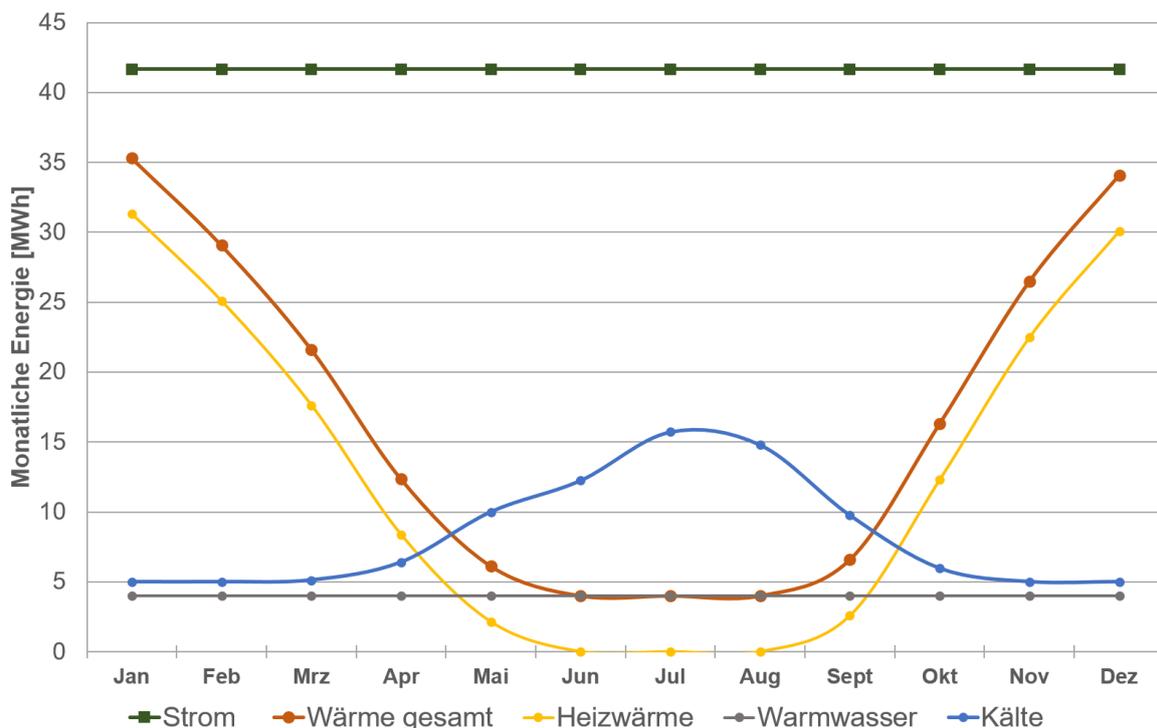


Abbildung 1: Abgeschätzte monatliche Energiebedarfe für den IntCDC-Neubau

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, wurde von einem über das Jahr konstanten Strombedarf ausgegangen. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass zum Zeitpunkt der Bedarfsabschätzung keine Informationen zum Betrieb der Maschinen vorlagen und deshalb diesbezüglich von keinen saisonalen Unterschieden ausgegangen wurde. Was die oben genannten weiteren Verbraucher anbelangt, kann von einem leicht erhöhten Strombedarf für Beleuchtung in den Wintermonaten und andererseits einem leicht erhöhten Strombedarf für Belüftung in den Sommermonaten ausgegangen werden, sodass dies insgesamt nur zu geringen saisonalen Unterschieden beim Stromverbrauch führen sollte. Eine Reduzierung des Strombedarfs über die Weihnachts- und Neujahrsfeiertage wurde hier vernachlässigt.

Der Verbrauch an Trinkwarmwasser für die Duschen und Teile der Labor- und Werkstattbereiche kann als über das Jahr konstant angenommen werden. Der Heizwärmebedarf zeigt den typischen saisonalen Verlauf mit dem höchsten Bedarf in den Wintermonaten. Zur monatlichen Aufteilung des Heizwärmebedarfs wurde hier auf Daten aus vorangegangenen Forschungsprojekten zurückgegriffen.

Der Kühlbedarf zeigt ebenfalls einen typischen Verlauf mit höheren Bedarfswerten in den Sommermonaten. Jedoch besteht auch in den Wintermonaten ein gewisser Kühlbedarf, was vor allem auf die Kühlung des Serverraumes zurückzuführen ist.

3.6 Aktuelle Arbeiten zur Konkretisierung der Bedarfsabschätzung

Von einem an der Gebäudeplanung beteiligten Partner wurde ebenfalls eine erste Energiebedarfsabschätzung durchgeführt, welche auf flächenspezifischen Bedarfswerten nach SIA2024:2015 [8] beruht. Für den jährlichen Wärme- und Kältebedarf ergaben sich demnach ähnliche Werte wie oben angegeben. Für den jährlichen Strombedarf wurde jedoch ein deutlich niedrigerer Wert von **300 MWh/a** ermittelt.

Eine hohe Unsicherheit bei der Abschätzung des Strombedarfs besteht insbesondere beim Betrieb der Maschinen und Anlagen im Labor- und Werkstattbereich. Um hier zu einer genaueren Abschätzung zu gelangen, wurde eine Untersuchung an einer Werkstatthalle durchgeführt, in welcher sich momentan der Großteil der später im IntCDC-Neubau aufzustellenden Maschinen befindet. Die Untersuchung bestand zum einen aus der Analyse von Messdaten des Stromverbrauchs der vergangenen etwa zweieinhalb Jahre. Zum anderen wurde eine Befragung von Mitarbeitenden der Werkstatt zum Betrieb der Maschinen durchgeführt. Dies beinhaltete auch die Aufzeichnung des Maschineneinsatzes über einen Zeitraum von zwei Wochen im November bzw. Dezember 2021.

Die Auswertung der Untersuchung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen. Es konnten jedoch bereits folgende wesentliche Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Aus der Analyse der Messdaten zeigt sich eine Saisonalität des Stromverbrauchs dahingehend, dass im Winter (leicht) höhere Verbrauchswerte zu verzeichnen sind. Über die Ursachen hierfür gibt es bislang nur Mutmaßungen, beispielsweise eine Begründung über Urlaubszeiten oder durch

Ventilatoren, die im Zusammenhang mit der Gebäudebeheizung in Betrieb genommen werden.

- Die Messdaten zeigen des Weiteren einen Anstieg des jährlichen Stromverbrauchs im Vergleich der Jahre 2019 bis 2021, was hauptsächlich auf neu hinzugekommene Maschinen zurückzuführen ist. In diesem Zusammenhang wird auch die Schwierigkeit einer Prognose des Maschinenparks im künftigen Neubau deutlich.
- Viele der Maschinen weisen nur geringe Betriebszeiten auf und es sind selten mehrere Maschinen gleichzeitig in Betrieb.
- Aufgrund des Forschungscharakters der im IntCDC-Neubau durchzuführenden Arbeiten werden beispielsweise bei den noch relativ häufig benutzten CNC-Dreh- und CNC-Fräsmaschinen nur geringe Stückzahlen an Werkstücken gefertigt. Ein Großteil der Betriebszeit ist hierbei Programmierarbeit, woraus vor allem ein Teillastbetrieb mit Stromverbräuchen deutlich unterhalb der Anschlussleistung resultiert.

Derzeit erfolgt eine genauere Analyse der in den bereits existierenden Werkstätten erhobenen Daten mit dem Ziel einer Überarbeitung der Abschätzung des Strombedarfs und dessen saisonalem Verlauf. Die Erkenntnisse der Untersuchung sind außerdem wichtig zur Beurteilung möglicher Kühlbedarfe, die aus dem Betrieb der Maschinen resultieren. Nach derzeitiger Einschätzung ist dieser Kühlbedarf aufgrund der geringen Nutzungsintensität der Maschinen allerdings als gering einzuschätzen.

4. Vorbetrachtungen zur Energieerzeugung

4.1 Photovoltaik

Als eine erste Vorbetrachtung im Hinblick auf klimaneutrale Energieversorgungskonzepte für den IntCDC-Neubau wurde eine Abschätzung der möglichen Erträge von vor Ort verfügbaren regenerativen Energieerzeugungstechnologien, insbesondere der elektrischen und thermischen Solartechnologien, vorgenommen. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, weist das Gebäude voraussichtlich eine Grundfläche von 90 m x 30 m auf. Da die konkrete Dachform bzw. -konstruktion zum Zeitpunkt der Abschätzung noch unbekannt war, wurde von einer Flachdachkonstruktion ausgegangen. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass aufgrund einer gegenseitigen Verschattung der aufgeständerten photovoltaischen oder solarthermischen Kollektoren nicht die gesamte Dachfläche mit Kollektoren belegt werden kann. Als konservative Abschätzung kann davon ausgegangen werden, dass die Bruttokollektorfläche etwa ein Drittel der Dachfläche, d. h. 900 m², beträgt.

Für die auf dem Dach installierten PV-Module wurde hierbei von einer Ausrichtung nach Süden und einer Neigung von 45° ausgegangen. Des Weiteren könnten maximal etwa 600 m² der Südfassade sowie 200 m² der Westfassade mit PV-Modulen belegt werden. Für die Ostfassade wird keine PV-Fläche vorgesehen, da dort durch den Anlieferungs- aber auch Versuchsbereich wahrscheinlich keine Möglichkeit hierfür

gegeben ist. Für die oben bezeichneten Flächen von insgesamt 1.700 m² Photovoltaik, welche einer Leistung von ca. 270 kW_p entsprechen, wurden mithilfe einer TRNSYS-Simulation für PV-Module mit einem maximalen Wirkungsgrad (MPP) von 16,1 %, die in Abbildung 2 dargestellten monatlichen PV-Erträge (innere Säulen) ermittelt. Der vergleichsweise geringe Wirkungsgrad der gewählten PV-Module stellt hierbei ebenfalls eine konservative Annahme dar. Die äußeren hellblauen Säulen in Abbildung 2 stellen den monatlichen Strombedarf des IntCDC-Gebäudes dar und ergeben in der Jahressumme 500 MWh.

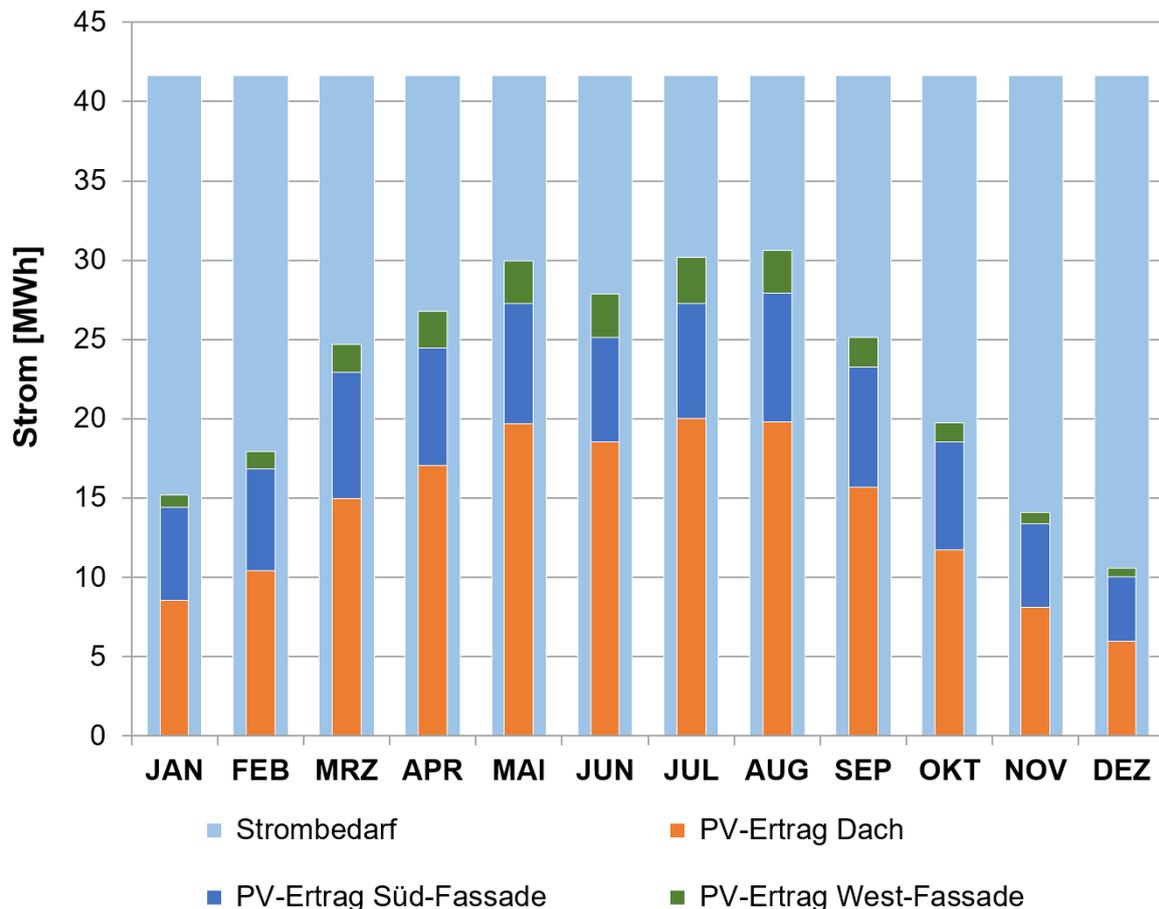


Abbildung 2: Monatliche PV-Erträge für eine gesamte PV-Fläche von 1.700 m² (ca. 270 kW_p) und monatliche Strombedarfe für den IntCDC-Neubau

Insgesamt ergibt sich ein jährlicher PV-Ertrag von ca. 273 MWh, wobei 171 MWh auf die Dachfläche, 81 MWh auf die Südfassade und 21 MWh auf die Westfassade entfallen. Der im Vergleich zu den Monaten Mai, Juli und August geringere PV-Ertrag im Monat Juni ist auf geringere Einstrahlungssummen in diesem Monat auf südlich ausgerichtete Flächen zurückzuführen. Der jährliche PV-Ertrag ist insgesamt deutlich kleiner als der jährliche Strombedarf, sodass sich selbst auf Basis einer Jahresbilanz keine klimaneutrale Stromversorgung des Gebäudes mithilfe von Photovoltaik realisieren lässt.

4.2 Solarthermie

Alternativ zur Belegung mit Photovoltaik-Modulen könnten auf der Dachfläche auch solarthermische Kollektoren installiert werden. Für Flachkollektoren mit einem Jahresertrag von ca. 400 kWh/(m²-a) würden sich für eine Bruttokollektorfläche von 900 m² die in Abbildung 3 durch die inneren orangenen Säulen markierten monatlichen Kollektorerträge ergeben. Die äußeren hellblauen Säulen in Abbildung 3 stellen die Summen der monatlichen Wärmebedarfe für Heizwärme und Trinkwarmwasser dar.

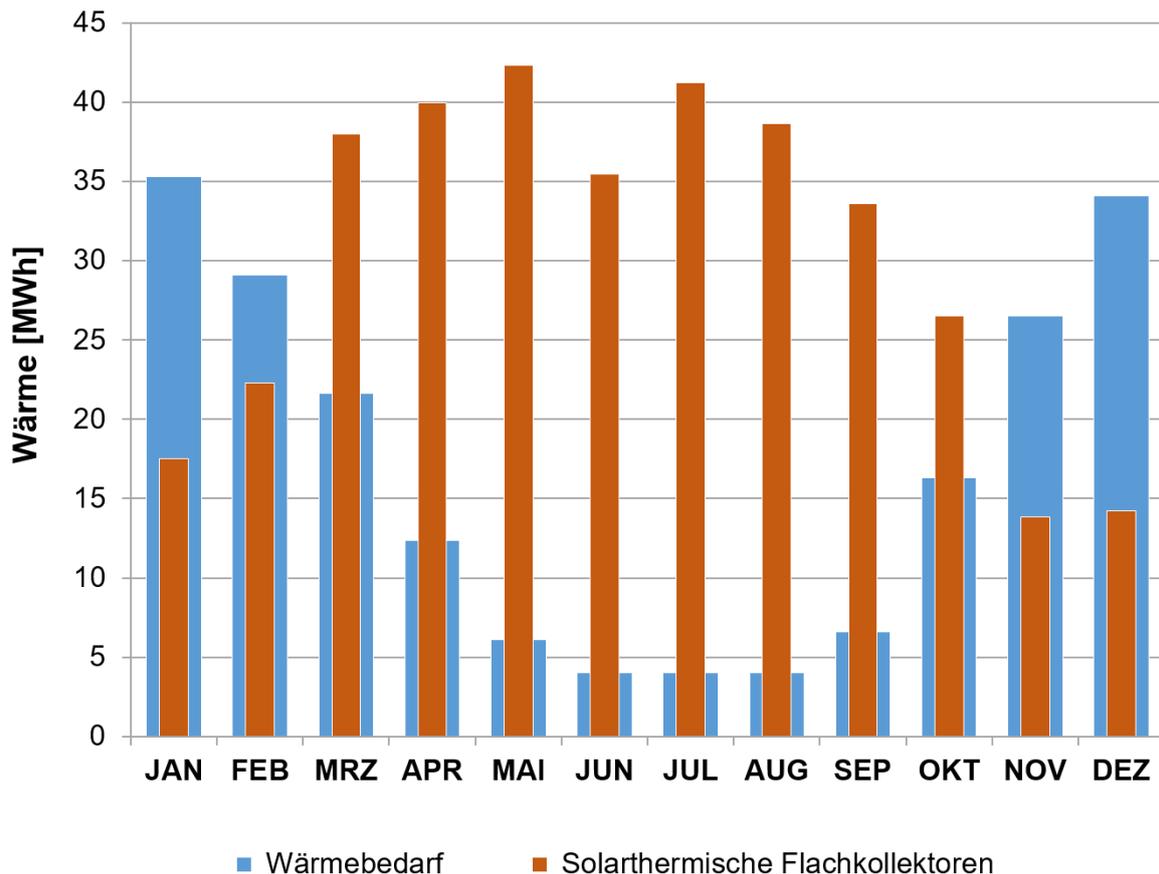


Abbildung 3: Monatliche Solarthermie-Erträge für eine Kollektorfläche von 900 m² und monatliche Wärmebedarfe für den IntCDC-Neubau

Aus Abbildung 3 ist erkennbar, dass sich im Sommer sehr viel höhere Kollektorerträge ergeben als Wärmebedarf besteht. Auch der Jahresertrag wäre mit ca. 360 MWh bei dieser Auslegung deutlich höher als der jährliche Wärmebedarf von 200 MWh. Zumindest auf Basis einer Jahresbilanz ließe sich der Wärmebedarf ausschließlich durch solarthermische Kollektoren und nur durch die Belegung der Dachfläche decken. Für eine Auslegung auf eine vollständige Deckung des Wärmbedarfes in den Sommermonaten wäre eine Kollektorfläche von ca. 120 m² ausreichend.

4.3 Photovoltaik + Solarthermie

Da eine Flächenkonkurrenz zwischen den beiden Solartechnologien besteht, stellt sich die Frage nach einer sinnvollen Belegung der verfügbaren Flächen mit PV-Modulen einerseits und solarthermischen Kollektoren andererseits. Abbildung 4 zeigt die erzielbaren solarelektrischen und solarthermischen Deckungsanteile, wenn die maximal verfügbare Bruttokollektorfläche von insgesamt 900 m² mit unterschiedlicher Intensität für Photovoltaik und Solarthermie genutzt wird. Für die Fassadenflächen wurde hierbei weiter von einer Belegung nur mit PV-Modulen ausgegangen, d. h. 600 m² für die Südfassade und 200 m² für die Westfassade.

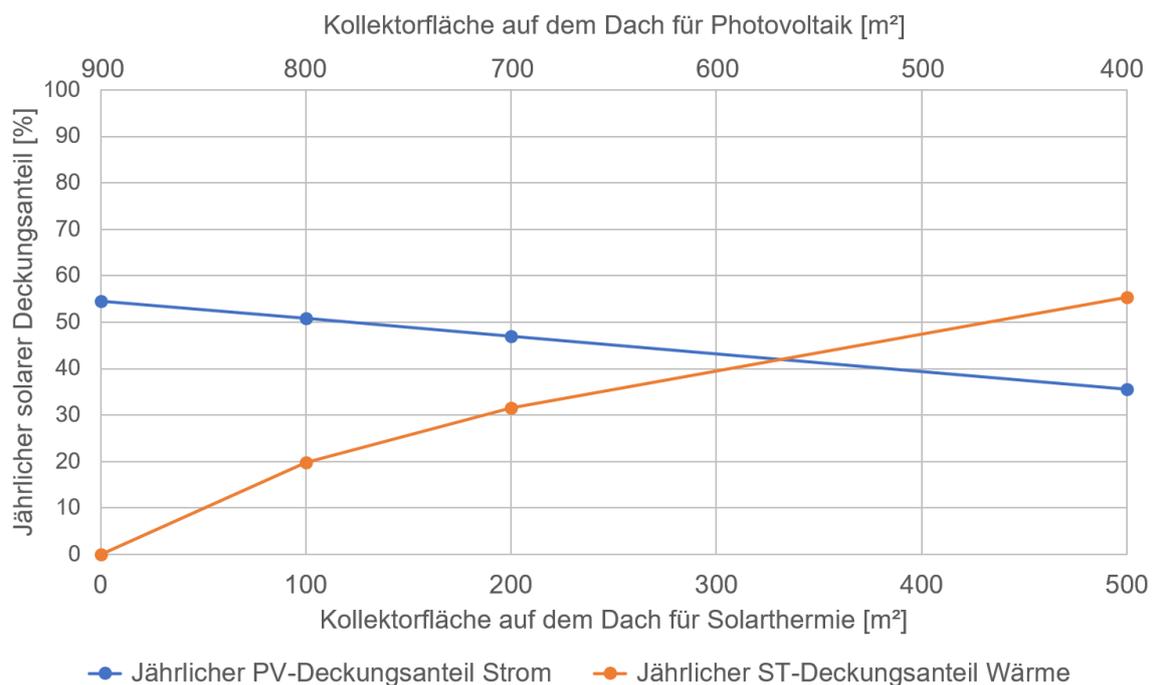


Abbildung 4: Jährliche solarelektrische und solarthermische Deckungsanteile in Abhängigkeit von der Aufteilung der verfügbaren Kollektorfläche auf dem Dach für Photovoltaik (PV) und Solarthermie (ST)

Der oben gezeigten Darstellung liegen monatliche Bilanzen zugrunde, wobei sowohl für die Solarthermie als auch für die Photovoltaik kein Einsatz von Energiespeichern berücksichtigt wurde. Da bei der Solarthermie, im Gegensatz zur Photovoltaik, keine Einspeisung der Überschüsse in ein Netz angenommen wurde, wird mit steigender Nutzung der verfügbaren Kollektorfläche durch Solarthermie der Anstieg des solarthermischen Deckungsanteils immer geringer, da im Sommer immer höhere nicht genutzte Überschüsse an Solarwärme entstehen. Nennenswerte Überschüsse an Solarwärme im Sommer entstehen ab einer Kollektorfläche von ca. 150 m². Größere Kollektorflächen sind daher nur in Verbindung mit (größeren) thermischen Speichern sinnvoll. Sofern die Fassadenkonstruktion dies ermöglicht, könnten die solarthermischen Kollektoren auch an der Fassade anstatt auf dem Dach installiert werden,

um eine höhere solarthermische Deckung des Wärmebedarfs in den Wintermonaten zu erreichen.

Des Weiteren wurde eine Ertragsabschätzung für den Einsatz von 200 m² PVT-Kollektoren auf dem Dach des IntCDC-Gebäudes vorgenommen. PVT-Kollektoren sind Hybridkollektoren die aus solarer Strahlungsenergie sowohl Wärme als auch Strom erzeugen. Die verbleibenden 700 m² verfügbarer Kollektorfläche auf dem Dach werden durch PV-Module genutzt, ebenso die oben genannten 600 m² der Südfassade und 200 m² der Westfassade. Die elektrischen und thermischen Erträge eines PVT-Kollektors sind abhängig von der konkreten hydraulischen Einbindung in die Wärmeversorgung, beispielsweise ob die PVT-Kollektoren direkt als Wärmequelle für eine Wärmepumpe dienen oder Wärme zur Erdreichregeneration bereitstellen. Die Erträge sind des Weiteren von der Betriebsstrategie und auch von der Art der Wärmepumpe, d. h. „konventioneller“ Wärmepumpenbetrieb unter Volllast mit entsprechender Taktung oder Leistungsanpassung durch Invertertechnologie, abhängig. Für die hier vorgenommene grobe Ertragsabschätzung wurden die technischen Daten eines PVT-Kollektors verwendet, welcher als einzige Wärmequelle für eine Inverter-Wärmepumpe dient, die vorzugsweise mit dem von den PVT-Kollektoren erzeugten Strom betrieben wird [9]. Des Weiteren wurde vereinfachend angenommen, dass die monatliche Verteilung der elektrischen Erträge des PVT-Kollektors der Verteilung der Erträge der PV-Module auf dem Dach entspricht. Für die Wärmebereitstellung aus dem PVT-Wärmepumpensystem wurde eine monatliche Verteilung angenommen, die sich aufgrund einer entsprechenden Regelung des Anlagenbetriebs am Wärmebedarf orientiert.

Abbildung 5 zeigt die elektrischen Erträge der PVT-Kollektoren und der PV-Module auf dem Dach und an der Fassade sowie den Strombedarf des IntCDC-Gebäudes und den zusätzlich aus dem Betrieb der Wärmepumpe resultierenden Strombedarf. Die PV-Module mit einer Gesamtfläche von 1.500 m² erzeugen insgesamt ca. 235 MWh/a an Strom. Die PVT-Kollektoren liefern einen Jahresertrag an Strom von ca. 38 MWh. Durch den zusätzlichen Strombedarf der hauptsächlich in der Heizperiode betriebenen Wärmepumpe ergibt sich insgesamt ein jährlicher Strombedarf von etwa 531 MWh. Abzüglich der Erträge aus den PV-Modulen und den PVT-Kollektoren ergibt sich damit eine jährlich aus dem Stromnetz zu beziehende Strommenge von etwa 258 MWh.

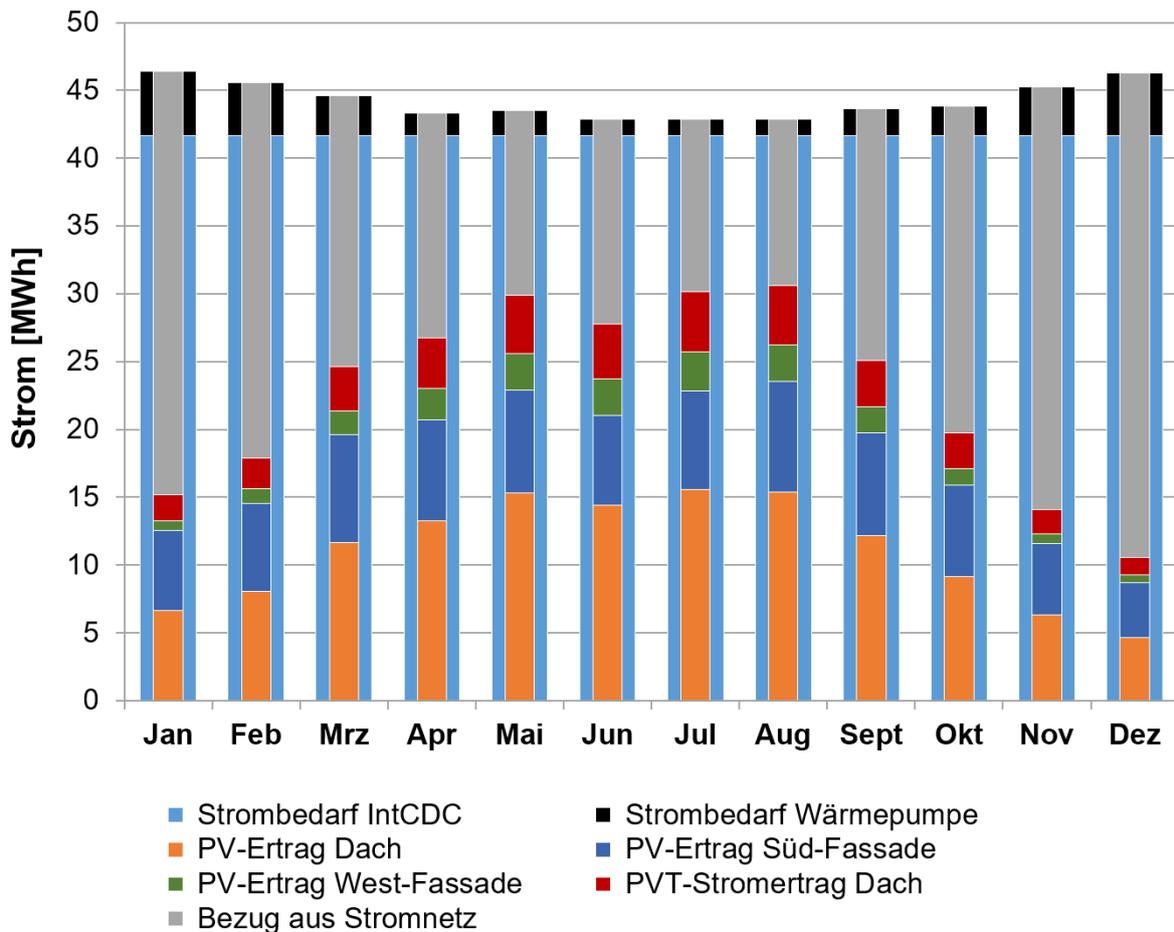


Abbildung 5: Strombedarf und Stromerzeugung für eine PVT-Fläche von 200 m² und eine gesamte PV-Fläche von 1.500 m²

Abbildung 6 zeigt die aus dem PVT-Wärmepumpensystem bereitgestellte Nutzwärme und den Wärmebedarf des IntCDC-Gebäudes. Vom PVT-Wärmepumpensystem werden ca. 103 MWh/a an Wärme bereitgestellt und somit etwa die Hälfte des Wärmebedarfs von 200 MWh/a gedeckt. Der verbleibende Anteil des Wärmebedarfs muss durch Bezug von Wärme aus dem bestehenden Wärmenetz des Campus gedeckt werden.

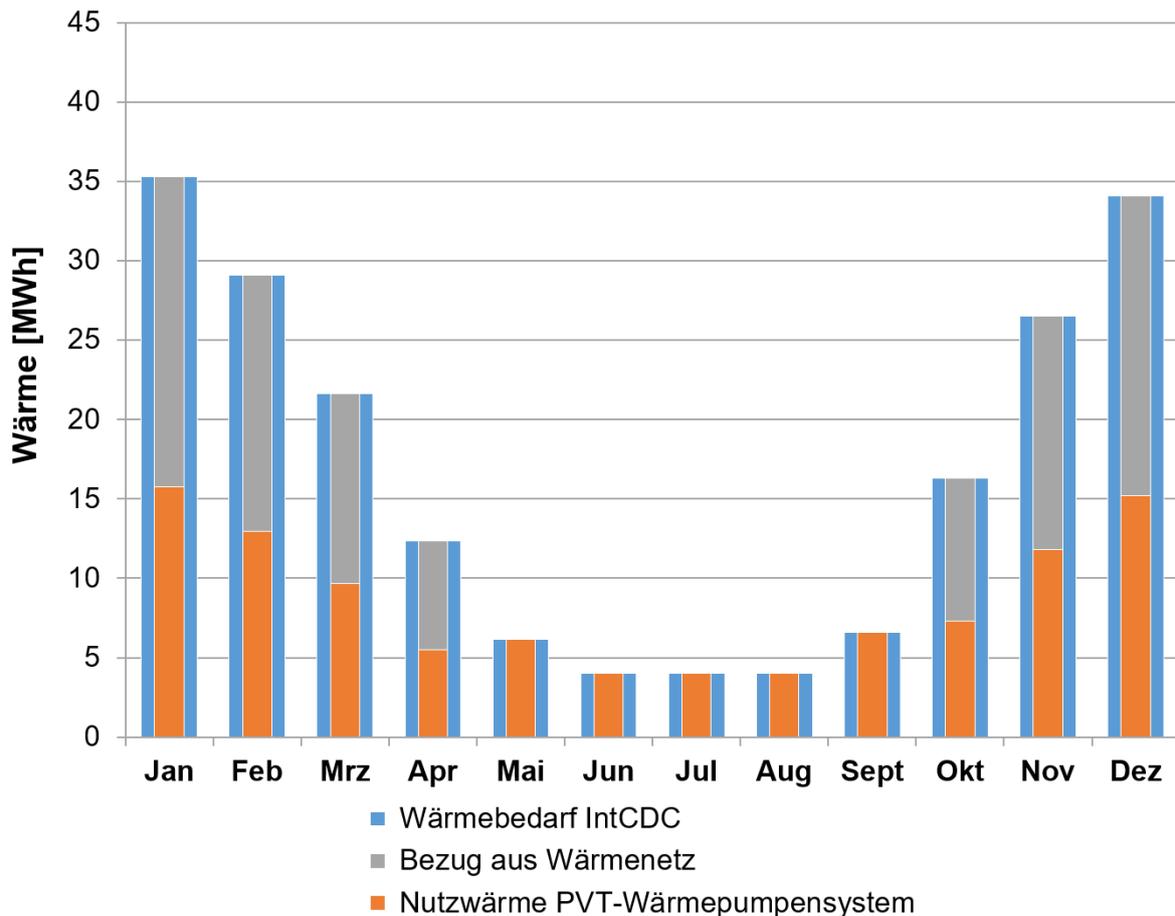


Abbildung 6: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch ein PVT-Wärmepumpensystem und das Wärmenetz des Campus Stuttgart-Vaihingen

4.4 Fazit der Vorbetrachtungen

Aus den oben präsentierten Vorbetrachtungen wird ersichtlich, dass sich durch den Einsatz von Photovoltaik und Solarthermie bzw. PVT-Kollektoren auf Jahresbilanzbasis ein signifikanter Anteil des Strom- und Wärmebedarfs des IntCDC-Gebäudes decken lässt. Jedoch sind die auf und am Gebäude verfügbaren Flächen nicht ausreichend, um den Strom- und Wärmebedarf vollständig durch den Einsatz von Solarenergie zu decken. Sofern keine weiteren lokalen regenerativen Erzeuger in Betracht gezogen werden oder der Strombedarf des Gebäudes bzw. insbesondere der darin vorgesehenen Werkstätten deutlich reduziert wird, ist es für die Realisierung eines klimaneutralen Gebäudes daher unabdingbar, das Heizkraftwerk auf eine regenerative Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung umzustellen, beispielsweise durch den Einsatz von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas.

5. Vorstellung der Energieversorgungskonzepte

5.1 Überblick über die vorgeschlagenen Konzepte

Im Anschluss an die oben dargelegten Vorbetrachtungen erfolgte die Erarbeitung von insgesamt drei Energieversorgungskonzepten. Hierzu wurde von einem an der Gebäudeplanung beteiligten Partner ein Konzept vorgeschlagen, welches im Wesentlichen auf die Nutzung von Geothermie in Verbindung mit einer reversibel arbeitenden Wärmepumpe für die Gebäudebeheizung und -kühlung setzt. Aus dem CampUS hoch i-Projektteam wurde ein alternatives Konzept erarbeitet, welches die Nutzung des bestehenden Kältenetzes als Wärmequelle für eine Wärmepumpe vorsieht. Das dritte Konzept ergibt sich aus dem Anschluss des IntCDC-Gebäudes an das bestehende Wärme- und Kältenetz und stellt somit die „Standardlösung“ für die Wärme- und Kälteversorgung der Gebäude auf dem Campus Vaihingen dar.

Im Folgenden wird näher auf die drei vorgeschlagenen Energieversorgungskonzepte eingegangen, wobei der Fokus auf der Wärme- und Kälteversorgung liegt. Bezüglich der Stromversorgung ist bei allen drei Konzepten eine möglichst großflächige Belegung der Dachfläche mit PV-Modulen und eine Deckung des verbleibenden Strombedarfs über das Stromnetz vorgesehen.

5.2 Konzept 1: Geothermie-Nutzung

In diesem Konzept dienen Erdwärmesonden als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, die einen wesentlichen Teil der Heizwärme über ein Niedertemperatur-Wärmesystem bereitstellt. Für eine ggf. notwendige Zusatzheizung sowie insbesondere zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser wird auch eine Anbindung an das bestehende Wärmenetz des Campus vorgesehen. Die Bereitstellung von Kälte wird einerseits über einen passiven Kühlbetrieb, d. h. die direkte Kühlung über die Erdwärmesonden, realisiert. Dieser Kühlbetrieb ist insbesondere zur Deckung des Kühlbedarfs in der Übergangszeit relevant. Andererseits ist insbesondere für den Hochsommer ein maschineller Kühlbetrieb vorgesehen, indem die Wärmepumpe als Kältemaschine betrieben und eine Rückkühlung über die Erdwärmesonden vorgenommen wird. Da, wie in Kapitel 3.5 erwähnt, auch in der Heizperiode ein gewisser Kühlbedarf besteht, ist des Weiteren bei diesem Konzept ein paralleler Heiz- und Kühlbetrieb vorgesehen. Hierbei kann im Gebäude anfallende Abwärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet werden.

5.3 Konzept 2: Kältenetz als Wärmequelle für eine Wärmepumpe

Das Konzept 2 sieht vor, das bestehende Kältenetz des Campus als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu nutzen. Dies ist möglich, da auch im Winter ausreichend Kältebedarf auf dem Campus-Gelände besteht. Die Temperaturniveaus im Kältenetz betragen ca. 6 °C im Vorlauf und 12 °C im Rücklauf. Durch die Entnahme von Wärme aus dem Rücklauf des Kältenetzes wird dieser abgekühlt, sodass sich hierdurch eine Verringerung der benötigten Kälteerzeugung in den Kompressionskälteanlagen in der Energiezentrale des Heizkraftwerkes ergibt. Die Wärmepumpe, welche den Rücklauf des Kältenetzes als Wärmequelle verwendet, soll wie bei Konzept 1 einen Großteil des

Heizwärmebedarfes decken. Als Zusatzheizung sowie insbesondere zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser kann ggf. auch hier wieder das bestehende Wärmenetz des Campus dienen. Die Bereitstellung von Kälte wird bei diesem Konzept über das bestehende Kältenetz des Campus realisiert. Grundsätzlich kann auch bei diesem Konzept ein paralleler Heiz- und Kühlbetrieb sowie eine teilweise Bereitstellung von Kälte über eine freie (passive) Kühlung realisiert werden. Jedoch sind hierfür ggf. entsprechende Rückkühlwerke vorzusehen.

5.4 Konzept 3: Nutzung der bestehenden Campus-Netze

Bei diesem Konzept erfolgt die Wärme- und Kältebereitstellung auf „konventionelle“ Weise, d. h. wie bei den anderen Gebäuden auf dem Campus auch durch eine Anbindung an das bestehende Wärme- und Kältenetz der Universität. Die Erzeugung von Wärme und Kälte für diese bestehenden Netze erfolgt wie in Kapitel 2.2 beschrieben im Heizkraftwerk (HKW).

5.5 Qualitative Bewertung der Konzepte

Sowohl von dem an der Gebäudeplanung beteiligten Partner, welcher das Konzept 1 mit der Geothermie-Nutzung erarbeitet hat, als auch vom CampUS hoch i-Projektteam wurde eine qualitative Bewertung der drei Konzepte vorgenommen. Hierzu wurden verschiedene Bewertungskategorien definiert und anschließend eine Bewertung anhand eines punkte- bzw. rangbasierten Schemas durchgeführt. Durch die subjektiven Einschätzungen und Erfahrungen der bewertenden Personen einerseits sowie durch die unterschiedlichen gewählten Bewertungskategorien und Punkteschemata andererseits ergaben sich sehr unterschiedliche Bewertungsergebnisse. Auf die detaillierten Ergebnisse der qualitativen Bewertung wird daher an dieser Stelle nicht eingegangen. Stattdessen werden im Folgenden ausgewählte Aspekte der Bewertung und die generellen Vor- und Nachteile der jeweiligen Konzepte erörtert.

Ein erster wichtiger Aspekt ist die ökonomische Betrachtung und hierbei insbesondere die der Investitionskosten. Das Konzept 1 ist dabei aufgrund der hohen Kosten für die Geothermie-Bohrungen mit den höchsten Investitionskosten verbunden, Konzept 3 mit den geringsten Investitionskosten. Konzept 3 zeichnet sich des Weiteren durch die geringsten Wartungskosten der drei Konzepte aus. Für Konzept 1 mit der Geothermie-Nutzung wird aufgrund der größeren Komplexität des Systems von den höchsten Wartungskosten der drei Konzepte ausgegangen. Die Bewertung der verbrauchsgebundenen Kosten (Energie- bzw. Brennstoffkosten) ist stark abhängig von den Annahmen zur Entwicklung der Preise für Strom und Gas bzw. perspektivisch für auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas. Insgesamt lässt sich jedoch schlussfolgern, dass die „Standardlösung“ Konzept 3 die geringsten Gesamtkosten verursacht, wohingegen Konzept 1 die höchsten Gesamtkosten aufweist.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Bewertung, inwieweit Klimaneutralität durch die jeweiligen Konzepte erreicht wird. Hierzu kann als erstes festgestellt werden, dass unter den derzeit vorliegenden Randbedingungen Konzept 3 mit den höchsten CO₂-Emissionen verbunden ist, da der Anteil fossiler Energieträger, primär Erdgas, für die

Erzeugung der in die elektrischen und thermischen Netze des Campus eingespeisten Energie noch relativ hoch ist, siehe Kapitel 2.2. Wie eingangs erwähnt, muss jedoch spätestens bis zum Jahr 2030 Netto-Treibhausgasneutralität für die Energieversorgung des Campus erreicht werden und dies bedeutet zwangsläufig „grüne“ Campus-Netze. Unter dieser Annahme wären im Jahr 2030 im Prinzip alle drei Konzepte „klimaneutral“. Wie die Klimaneutralität der elektrischen und thermischen Campus-Netze künftig erreicht wird, beispielsweise durch die Nutzung von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas im HKW oder durch andere Kompensationsmaßnahmen, ist derzeit nicht bekannt. Wie ebenfalls bereits erwähnt muss hierzu festgelegt werden, wie Klimaneutralität an der Universität Stuttgart genau definiert wird.

Des Weiteren sollte für den Neubau des IntCDC-Gebäudes geklärt werden, inwieweit nicht nur das Forschungsgebäude an sich, sondern auch dessen Energieversorgungskonzept ein Vorzeigeobjekt mit einem hohen Maß an Innovation darstellen soll. Das Konzept 3 stellt diesbezüglich eine rein konventionelle Lösung dar. Bei Konzept 1 ist mit der Geothermie-Nutzung, Aspekten wie freier Kühlung und parallelem Heiz- und Kühlbetrieb ein gewisses Maß an Innovation gegeben; jedoch ist diese Geothermie-Nutzung nichts völlig Neues. Im Gegensatz hierzu ist die Nutzung des Kältenetzes als Wärmequelle bei Konzept 2 eine deutlich innovativere Lösung, die darüber hinaus auch als Modell für zukünftige ähnliche Wärmeversorgungskonzepte dienen könnte.

Das Konzept 2 bietet zusätzlich den Vorteil, dass eine spätere Nutzung von Abwärme aus dem Höchstleistungsrechenzentrum (HLRS) über ein Niedertemperatur-Wärmenetz deutlich einfacher realisierbar ist als bei Konzept 1 und bei Konzept 3. Denn bei Konzept 1 ist aufgrund der hohen Investitionskosten der Erdwärmesonden ein mittelfristiger Anschluss an ein solches Niedertemperatur-Wärmenetz praktisch ausgeschlossen. Bei Konzept 3 müsste für die Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme noch eine Wärmepumpe installiert werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die „Standardlösung“ Konzept 3 bzgl. vieler Aspekte, wie z. B. Investitionskosten, Platzbedarf im Gebäude, Komplexität, Funktions- und Genehmigungsrisiken, die attraktivste, weil einfachste Lösung darstellt, dafür aber keinerlei Innovation aufweist und unter den derzeit vorliegenden Randbedingungen mit den höchsten CO₂-Emissionen verbunden ist. Konzept 1 mit der Nutzung der Geothermie weist eine vergleichsweise hohe Komplexität und vor allem sehr hohe Investitionskosten auf. Bei Konzept 2 sind insbesondere der Effekt der Einsparung von Primärenergie und damit auch CO₂-Emissionen durch die Entnahme von Wärme aus dem Kältenetz und damit einer Verringerung der benötigten Kälteerzeugung in der Energiezentrale des HKWs sowie der hohe Innovationsgrad zu nennen.

Letztlich muss von den Entscheidern eine Priorisierung der Bewertungskriterien in wesentliche und nachrangige Kriterien vorgenommen werden. Außerdem muss die übergeordnete Strategie der Energieversorgung des gesamten Campus berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere die Entscheidung, wann und wie die elektrischen und thermischen Netze klimaneutral werden sollen sowie, ob und in welcher Form eine Nutzung der Abwärme aus dem Höchstleistungsrechenzentrum für den Campus

zeitnah erfolgen soll. Ergänzend ist für eine endgültige Entscheidung für ein bestimmtes Energieversorgungskonzept zu berücksichtigen, welche Relevanz die Vorgabe des Exzellenzclusters IntCDC hat, dass das Gebäude bereits bei der für das Jahr 2025 avisierten Inbetriebnahme klimaneutral betrieben werden soll und welche finanziellen Mittel hierfür investiert werden können bzw. sollen.

6. Fazit und Ausblick

Für den derzeit in Leistungsphase 2 der Planung befindlichen Neubau des IntCDC-Forschungsgebäudes wurden, wie in diesem Beitrag gezeigt, Abschätzungen der Bedarfe für Strom, Wärme und Kälte sowie Vorbetrachtungen zur regenerativen Energieerzeugung, insbesondere durch Photovoltaik und/oder Solarthermie, vorgenommen. Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern insgesamt drei Energieversorgungskonzepte erarbeitet und eine erste qualitative Bewertung der drei Konzepte vorgenommen. Als Schlussfolgerung dieser Bewertung ergab sich, dass es vor allem von strategischen und finanziellen Entscheidungen hinsichtlich der relevanten Aspekte für den Neubau aber auch hinsichtlich der Energieversorgung des gesamten Campus abhängt, welches Konzept realisiert werden sollte.

Nach den derzeit erfolgenden Diskussionen zur Bewertung der vorgeschlagenen Energieversorgungskonzepte wird sich in Leistungsphase 3 der Planung die weitere Detaillierung des favorisierten Energieversorgungskonzeptes anschließen. Die Leichtbaukonstruktion stellt hierbei aufgrund der damit einhergehenden geringen thermischen Kapazität des Gebäudes eine Herausforderung für dessen Temperierbarkeit dar, insbesondere vor dem Hintergrund der bereits getroffenen Entscheidung der Beheizung des Gebäudes über eine Niedertemperatur-Heizsystem und der sich daraus ergebenden Begrenzung realisierbarer Temperaturgradienten bei der Wärmeversorgung.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Drück; D. Bestenlehner: „Die Definition von Klimaneutralität und ihre Relevanz für die Solarthermie“. Zur Veröffentlichung im Tagungsband des Symposiums Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2022, 03.-05.05.2022, Kloster Banz, Bad Staffelstein
- [2] Ergebnisse der “Umfrage zur Klimaneutralität an der Universität Stuttgart: Wo wollen wir hin? Wie kommen wir da hin?“, <https://www.beschaefigte.uni-stuttgart.de/uni-aktuell/meldungen/Umfrage-an-Universitaet-Stuttgart-Klimaschutz-vor-Ort-gewuenscht/>
- [3] Exzellenzcluster IntCDC (Integrative Computational Design and Construction for Architecture) der Universität Stuttgart, <https://www.intcdc.uni-stuttgart.de/>
- [4] Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI), 2021 <https://www.hoai.de/hoai/volltext/hoai-2021/>

- [5] Technische Daten des Heizkraftwerks der Universität Stuttgart, <https://www.hkw.uni-stuttgart.de/technik/>
- [6] C. Bahret; L. Eltrop; K. Hufendiek: „Integriertes Energiekonzept für den Uni-Standort Campus Vaihingen“. Abschlussbericht zum Projekt E-CampusUS <https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/e-campus/>
- [7] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden. BBSR-Online-Publikation 20/2019, Bonn, Dezember 2019 <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-20-2019.html>
- [8] SIA2024:2015: „Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik“. Merkblatt des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA), Referenznummer SNR 592024:2015, 01.10.2015
- [9] Consolar Solare Energiesysteme GmbH: SOLINK. Die Energiequelle für Wärmepumpen. Technische Dokumentation TD_SOLINK_2020_02_14_mr. https://www.consolar.de/wp-content/uploads/2020/10/TD_SOLINK_2020_02_14_mr.pdf

Danksagung

Das Projekt CampUS hoch i – CampUS intelligent gemacht (Intelligente und nutzer*innenorientierte Planungsprozesse für Klimaneutralität im Gebäude und Quartier am Beispiel des Campus Vaihingen) wird durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Bundeslandes Baden-Württemberg, Aktenzeichen 31-0421.915-4/155/98 gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

An dem Vorhaben sind die folgenden Institute bzw. Institutionen der Universität Stuttgart beteiligt:

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Green Office.