



JAHRESBERICHT

2022

Jahresbericht 2022

Gegründet 2011.

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Technische Hochschule Nürnberg Georg-Simon-Ohm
ZAE Bayern e.V.
Fraunhofer IIS
Fraunhofer IISB
Fraunhofer IBP

Denken.Forschen.Handeln

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	1
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN.....	2
STRUKTURFÖRDERNDE VERBUNDPROJEKTE	19
EnCN GESCHÄFTSSTELLE.....	48
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	57
Projekt Effizienz.....	58
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN.....	90
Lehrstuhl für Leistungselektronik	91
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN	98
Projekt Energiemarktdesign	99
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEN	100
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld.....	101
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“	113
FORSCHUNGSBEREICH NETZE	116
Projekt Netze	117
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER	122
Projekt Speicher	123

Vorwort



Der Energie Campus Nürnberg wurde im Jahr 2011 als gemeinsame Forschungsplattform der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und der Technischen Hochschule Nürnberg (THN) sowie weiteren Forschungsinstitutionen gegründet. Seitdem arbeiten die Wissenschaftler:innen der verschiedenen Institutionen gemeinsam „unter einem Dach“ an wichtigen Themenstellungen der Energiewende, der Dekarbonisierung und dem Klimaschutz. Dabei orientieren sie sich am Bedarf in der sogenannten „Energiekette“, nämlich der Regenerativen

Energieerzeugung, der Energiespeicherung und dem Energietransport, den Stromnetzen, der effizienten Energienutzung, dem Energiemarktdesign und Energiemanagement-Technologien. Durch die Bündelung verschiedener Kompetenzen am Standort des EnCN „Auf AEG“, besteht die einmalige Möglichkeit, Forschungsthemen ganzheitlich aus verschiedenen Blickrichtungen und Disziplinen zu beleuchten. Der Schlüssel zum Erfolg sind die Wissenschaftler:innen und Studierenden, die in den EnCN-Laboren institutionsübergreifend an der Entwicklung zukunftsweisender Technologien arbeiten. Dabei handelt es sich sowohl um eigene, singulär durchgeführte Forschungsprojekte, als auch um Verbundvorhaben mit mehreren Forschenden aus den beteiligten Institutionen.

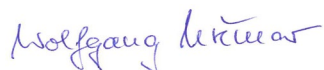
Über die Jahre haben sich eine ganze Reihe von Institutionen sowie Lehrstühle der FAU und Arbeitsgruppen der THN am Standort „Auf AEG“ angesiedelt. Sie beschäftigen sich mit Energiethemen der Zukunft und verwandten Gebieten und schaffen die notwendigen Synergien für gemeinsame Forschung.

Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN hat mit der „Wasserstofftechnologie“, den „Energieeffizienten Gebäuden“ und „Intelligenten Energiesystemen“ die derzeit bearbeiteten Forschungsschwerpunkte definiert. Dabei handelt es sich um wichtige Schlüsseltechnologien zur Umsetzung der Energiewende. Die Wissenschaftler:innen im EnCN haben auf den genannten Gebieten umfangreiche Expertise und sind bestens ausgerüstet, um die benötigten Forschungsergebnisse gemeinsam zu erarbeiten. Durch die gelebte, enge Verzahnung zwischen Forschung und Industriebetrieben wird ein schneller Technologietransfer möglich.

Mit der Durchführung „Strukturfördernder Verbundprojekte“ zwischen den am EnCN beteiligten Institutionen erfolgt eine gezielte Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. In den letzten 6 Jahren wurden 12 Start-Up-Unternehmen aus dem direkten Umfeld des EnCN gegründet und befördern mit Neuentwicklungen und Know-how die Energiewende. Als jüngste Innovation hat die Stadt Nürnberg im Schulterschluss mit Partnern den „NKubator“ als Innovations- und Gründerzentrum für Energie, GreenTech und Nachhaltigkeit am Standort „Auf AEG“ aufgebaut. Im „NKubator“ erhalten neugegründete Start-Up-Unternehmen die Möglichkeit, die ersten Schritte zur Umsetzung ihrer Geschäftsideen in einem geeigneten Umfeld zu unternehmen.

Der EnCN wurde seit seiner Gründung stetig weiterentwickelt und wirkt heute als weithin strahlender Leuchtturm für zukunftsorientierte Forschung in der Europäischen Metropolregion Nürnberg und ganz Bayern. Mit seiner Ausrüstung, den breiten fachlichen Kompetenzen und vielen Kooperationspartnern ist er bestens aufgestellt, um den Weg zu einer klimaneutralen Gesellschaft zu ebnen. Die einzigartige Aufstellung des EnCN ist dabei Vorbild für zukünftige Forschungsnetzwerke, in denen erfolgreiche Forschung interdisziplinär, ganzheitlich und über Instituts Grenzen hinweg stattfinden kann. Der EnCN hat sich zu einer unersetzlichen und weit über die Grenzen Bayerns bekannten Forschungsplattform für Energie entwickelt und wird diesen Weg auch weiter gehen.

Dezember 2022



Prof. Dr. Wolfgang Krcmar, Vorsitzender der Wissenschaftlichen Leitung des EnCN

EnCN im Überblick

Im Jahr 2022 startete der Energie Campus Nürnberg (EnCN) in die dritte Förderphase. Der Freistaat Bayern förderte die Kooperation im Jahr 2022. Die Fördermittel standen insbesondere für die Fortführung der erfolgreichen Forschungsarbeiten und die weitergehende Vernetzung der Partner, sowie für die Geschäftsstelle und die Anmietung und den Betrieb der gemeinsamen Forschungsimmobilie zur Verfügung. Für die institutions- und disziplinübergreifende Forschungsarbeit der Wissenschaftler im EnCN wurden 400.000 € im Jahr 2022 vom Freistaat Bayern zur Verfügung gestellt. Die Zusammenarbeit der Partnerorganisationen im EnCN wurde in einem Memorandum of Understanding (MoU) geregelt, das von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (THN), dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie (IISB) sowie dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) gemeinsam ausgearbeitet wurde. Die Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach ist seit der zweiten Förderperiode als weiterer Forschungspartner des EnCN mit Projektbeteiligung im Forschungsbereich Effizienz hinzugekommen. Der Start der dritten Förderphase verlief sehr erfolgreich. Insgesamt arbeiteten 155 Forscherinnen und Forscher in den sechs Forschungsbereichen, davon 45 Mitglieder der EWL und 110 Mitarbeiter. Darüber hinaus sind ständig Studierende der drei beteiligten Hochschulen im EnCN aktiv und bearbeiten im Rahmen der laufenden Forschungsprojekte ihre Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen. Die Forschungsarbeiten verteilen sich auf eine Fläche von 5.200 qm mit insgesamt 30 Laboren, Technika und Büroräumen.

1 Organisation

Die Organisation des Energie Campus Nürnberg besteht im Wesentlichen aus zwei Strukturen. Eine übergeordnete Leitungsstruktur, bestehend aus der *Wissenschaftlichen Leitung*, sowie der *Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung* des EnCN und der Geschäftsstelle des EnCN, sowie einer Projektstruktur, die sich aus insgesamt 6 Forschungsbereichen zusammensetzt. Darüber hinaus arbeiten die Forscher auch in bereichsübergreifenden Drittmittelprojekten zusammen.

Themen- und Projektstruktur

Inhaltlich orientieren sich die sechs Forschungsbereiche des EnCN entlang der Energiekette, von der regenerativen Energieerzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zur effizienten Nutzung von Energie (Abbildung 1). Außerdem bearbeiten die Forschungspartner bereichsübergreifend gemeinsame Verbundprojekte, die auf dem Campus des EnCN zusammengeführt werden.

Forschungsbereiche des EnCN



Abbildung 1: Überblick über die EnCN - Forschungsbereiche entlang der Energiekette

Die Forschungsbereiche sind Erneuerbare Energien, Energiespeicher, Elektrische Netze, Effiziente Energienutzung, Energiemarktdesign und Energiemanagement-Technologien. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend und disziplinübergreifend organisiert. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilaufgaben werden aber auch in den Forschungseinrichtungen durchgeführt, weil in der Infrastrukturausstattung des EnCN nicht alle benötigten Laboreinrichtungen vorhanden sind.

In allen Forschungsbereichen bearbeiten die Wissenschaftler Drittmittelprojekte, die von verschiedensten Fördermittel- bzw. Auftraggebern (Land, Bund, EU, Industrie) finanziert werden. In allen Forschungsbereichen ist erfolgreiche Technologieentwicklung und Markteinführung dringend notwendig, um die weitere erfolgreiche Transformation und Dekarbonisierung des Energiesystems voranzubringen. Die Akteure im EnCN haben in den genannten Bereichen umfangreiche Forschungsexpertise. Die Komplexität der Fragestellungen bedingt eine Zusammenarbeit über Disziplin- und Institutionsgrenzen hinweg. Die am EnCN geschaffenen Strukturen bieten dafür eine ideale Voraussetzung. Innerhalb dieser Schwerpunkte erfolgt auch die strukturierte Weiterentwicklung.

Wissenschaftliche Leitung (WL)

Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN ist verantwortlich für die Steuerung der EnCN-Aktivitäten. Für jeden der 6 Forschungsbereiche wird aus den Reihen der am Forschungsbereich beteiligten Wissenschaftler ein Sprecher bestellt. Eine Ausnahme bildet der Bereich Speicher, der zwei Sprecher bestellt. Die Wissenschaftliche Leitung tagt in ca. 6-wöchigem Rhythmus. Innerhalb der Wissenschaftlichen Leitung findet der Informationsaustausch über laufende Aktivitäten und Arbeitsstände in den Projekten statt. Die Wissenschaftliche Leitung berät und initiiert themenübergreifende Aktivitäten, die strategische Ausrichtung des EnCN sowie Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung.



Abbildung 2: Wissenschaftliche Leitung (1. Reihe v.l.n.r. Prof. Luther, Prof. Grimm, Prof. Wasserscheid, 2. Reihe v.l.n.r. Prof. März, Prof. Brabec, Prof. Krcmar, Prof. Karl)

Mitglieder der Wissenschaftliche Leitung sind:

Vorsitzender der

Wissenschaftlichen Leitung: Prof. Dr. Wolfgang Krcmar (THN)

Sprecher der

Forschungsbereiche

Prof. Dr. Christoph Brabec (Erneuerbare Energien; FAU/HI-ERN)
 Prof. Dr. Veronika Grimm (Energiemarktdesign; FAU)
 Prof. Dr. Jürgen Karl (Speicher A; FAU)
 Prof. Dr. Wolfgang Krcmar (Effizienz; THN)
 Prof. Dr. Matthias Luther (Netze; FAU)
 Prof. Dr. Martin März (Energiemanagement-Technologien; FAU/FhG)
 Prof. Dr. Peter Wasserscheid (Speicher B; FAU)

Erweiterte Wissenschaftliche Leitung (EWL)

Die Erweiterte Wissenschaftliche Leitung besteht aus den Mitgliedern der Wissenschaftlichen Leitung, den Teilprojektleitern in den verschiedenen Forschungsbereichen sowie weiteren ausgewählten Mitgliedern. In diesem Gremium werden gemeinsame Aktivitäten am EnCN sowie Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung besprochen. Außerdem werden wissenschaftliche Themen aus den einzelnen Forschungsbereichen vorgestellt und diskutiert. Das Gremium wurde mit Beginn der zweiten Förderphase ins Leben gerufen, um die enge Kooperation aller am EnCN beteiligten Projektverantwortlichen zu befördern und die Weiterentwicklung ständig mit allen beteiligten Wissenschaftlern voranzutreiben. Ziel ist eine möglichst enge Vernetzung aller Beteiligten und die Initiierung von disziplin- und institutionsübergreifenden Forschungsaktivitäten. Die Erweiterte Wissenschaftliche Leitung trifft sich in der Regel im Anschluss einer Sitzung der Wissenschaftlichen Leitung.

Tabelle 1: Mitglieder der Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung im Zeitraum

Name	Institution	Forschungsbereich
Prof. Dr. Christoph Brabec	FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften HI-ERN	Erneuerbare Energien, Speicher
Prof. Dr. Arno Dentel	THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik	Effizienz
Prof. Dr. Armin Dietz	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
Dr. Hans-Joachim Egelhaaf	ZAE, Bereich Erneuerbare Energien	Erneuerbare Energien
Dr. Jonas Egerer	FAU, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie	Energiemarktdesign
Dr. Patrick Schühle	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Reinhard German	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Prof. Dr. Veronika Grimm	FAU, Lehrstuhl für Wirtschaftstheorie	Energiemarktdesign, Speicher
Prof. Dr. Martin Hartmann	FAU, Professur für Katalyse	Speicher
Dr. Jens Hauch	HI-ERN	Erneuerbare Energien
Dr. Thomas Heckel	FhG IISB	Energiemanagement- Technologien
Prof. Dr. Wolfgang HeiB	FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften	Erneuerbare Energien
Prof. Dr. Jürgen Karl	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Dr. Andreas Distler	FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften	Erneuerbare Energien

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET

Name	Institution	Forschungsbereich
Prof. Dr. Günter Kießling	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
Prof. Dr. Wolfgang Krcmar	THN, Fakultät Werkstofftechnik	Effizienz, Speicher
Prof. Dr. Andreas Kremser	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
Prof. Dr. Frauke Liers	FAU, Professur für Diskrete Optimierung in den Ingenieurwissenschaften	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Matthias Luther	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Prof. Dr. Alexander Martin	FAU, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik FhG IIS, Analytics	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Martin März	FAU, Lehrstuhl für Leistungselektronik FhG IISB, Energieelektronik	Energiemanagement-Technologien
Dr. Gert Mehlmann	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Dr. Dominik Müller	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Prof. Dr. Katharina Herkendell	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Prof. Dr. Wolfgang Schlüter	HSA, Kompetenzzentrum für industrielle Energieeffizienz	Effizienz
Prof. Dr. Alexander Buchele	HSA, Kompetenzzentrum für industrielle Energieeffizienz	Effizienz
Prof. Dr. Peter Wasserscheid	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Prof. Dr. Michael Wensing	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher
Prof. Dr. Stefan Will	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher

Geschäftsstelle

Zur Koordination ihrer Aktivitäten und zur Unterstützung der Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und der Wissenschaftlichen Leitung selbst hat der EnCN eine Geschäftsstelle eingerichtet, welche ebenfalls aus EnCN-Fördermitteln finanziert wird. Die Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Sie ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bzw. den Sprecher bei der Repräsentation nach außen und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Die Geschäftsstelle organisiert auch die Zusammenarbeit mit dem EnCN Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind ab 01.01.2022 bei der FAU angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.

Förderverein EnCN e.V.

Der Energie Campus Nürnberg e.V. (EnCN e.V.) ist ein gemeinnütziger Verein zur Förderung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten am Energie Campus Nürnberg. Mitglieder sind die wissenschaftlichen Partner des Energie Campus Nürnberg, die Stadt Nürnberg, die IHK Nürnberg für Mittelfranken und die Handwerkskammer für Mittelfranken. Der Förderverein lobt jährlich den EnCN Energiepreis und das Reisestipendium aus.

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET

Vorstandsvorsitzender	Christian Zens (Kanzler der FAU)
Stellvertretende Vorsitzende	Prof. Dr. Arno Dentel (THN) Prof. Dr. Albert Heuberger (Leiter des Fraunhofer IIS)
Weitere Vorstandsmitglieder	Dr. Michael Fraas (Wirtschaftsreferent der Stadt Nürnberg)
Geschäftsstelle	Peter Haas (Wirtschaftsförderung der Stadt Nürnberg)

Lenkungsausschuss

Der Lenkungsausschuss besteht aus je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter der Leitungen der Partnerorganisationen FAU, THN, Fraunhofer IISB und je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter von Institutionen, die den EnCN strukturell über einen längeren Zeitraum mit erheblichen finanziellen Mitteln unterstützen, wie der Stadt Nürnberg und der Bayerischen Ministerien für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie bzw. Wissenschaft und Kunst. Er berät über die Leitlinien für die Zusammenarbeit der Partnerorganisationen sowie die thematische Fokussierung des EnCN und berät die WL in allen Angelegenheiten.

Fachbeirat

Zur Beurteilung des Fortschritts des EnCN und zur Beratung der Ministerien wurde durch die Ministerien ein Fachbeirat mit derzeit 11 Mitgliedern berufen. Dieser setzt sich aus Vertretern der Industrie, der Wissenschaft und der Gesellschaft zusammen. Der Fachbeirat hat die Aufgabe, die Wissenschaftliche Leitung über die strategische und inhaltliche Ausrichtung des EnCN zu beraten und nimmt Stellung zum jährlichen Gesamtbericht der Wissenschaftlichen Leitung.



Abbildung 3: Fachbeirat (1. Reihe v.l.n.r. Prof. Luther, Prof. Lorenz, Prof. Weidner, 2. Reihe v.l.n.r. Dr. Hellinger, Dr. Fraas, Prof. Kemfert, Prof. Westermann, Prof. Weber, Dr. Klaus Molitoris)

Mitglieder des Fachbeirats	Dr. Reinhold Achatz - Aufsichtsrat Unity AG Dr. Michael Fraas - Wirtschaftsreferat der Stadt Nürnberg Josef Hasler - Vorstand N-ERGIE AG Prof. Dr. Rolf Hellinger - Vice President Siemens AG Prof. Dr. Claudia Kemfert - Abteilungsleiterin DIW Berlin Prof. Dr. Leo Lorenz - Präsident European Center for Power Electronics Prof. Dr. Joachim Luther - ehem. Leiter Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Markus Löttsch - IHK Nürnberg für Mittelfranken Prof. Dr. Christoph Weber - Universität Duisburg-Essen
-----------------------------------	---

Prof. Dr. Eckhard Weidner - Leiter Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Prof. Dr. Dirk Westermann - Institutsdirektor Technische Universität Ilmenau

Berichtswesen

Der EnCN berichtet einmal im Jahr an das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie sowie an das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (StMWK) in Form eines gemeinsamen internen Jahresberichts.

Der Bericht zur Verwendung der bewilligten Fördermittel unterliegt der bayerischen Haushaltsordnung und erfolgt durch die einzelnen Partnerinstitutionen direkt an die zuständigen Ministerien.

Der Jahresbericht 2022 besteht aus den Berichten der einzelnen Forschungsbereiche und Projekte. Er ist ein internes Dokument, um die Fördermittelgeber über den Fortschritt der Arbeiten und die Entwicklung des Energie Campus Nürnberg zu informieren. Der hier vorgelegte interne Abschlussbericht enthält eine Zusammenfassung über den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022.



Abbildung 4: Das EnCN Hauptgebäude bietet auf einer Fläche von 5000 qm, verteilt auf 5 Stockwerke, Raum für rund 150 Forscher und für Veranstaltungen mit bis zu 170 Besuchern.

Standort und Netzwerk

Als Standort für den EnCN wurde von den Kooperationspartnern im Frühjahr 2012 eine Immobilie im Nürnberger Westen „Auf AEG“ gemietet. Das Gelände befindet sich zwischen den Zentren von Nürnberg und Fürth.

In den Jahren 2012/2013 erfolgte die Renovierung und der Umbau einer stillgelegten Industriebrache, mit einer Fläche von ca. 6.000 qm, verteilt auf zwei Gebäude. Darin entstanden Labore, Technika, Werkstätten und Büros für rund 150 Forscher aus den sechs Gründerinstitutionen des EnCN. Auf demselben Campus „Auf AEG“ wurden seitens der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg auch verschiedene Lehrstühle und Projekte angesiedelt, mit denen der EnCN kooperiert. Diese sind der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung (FAPS), Lehrstuhl für Leistungselektronik, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme, das E|Drive Center, das E|Home Center, die Green Factory Bavaria sowie das Helmholtz Institut für Erneuerbare Energien (HI ERN). Außerdem sind Arbeitsgruppen der Technischen Hochschule Nürnberg (THN) und Lehrstühle der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Nuremberg Campus of Technology (NCT) vertreten, mit denen der EnCN ebenfalls eng zusammenarbeitet. Durch die weitere Ansiedlung von Institutionen auf dem AEG Gelände ist eine Forschungsfläche von ca. 12.000 qm mit direktem Bezug zu Energiethemen entstanden.

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET

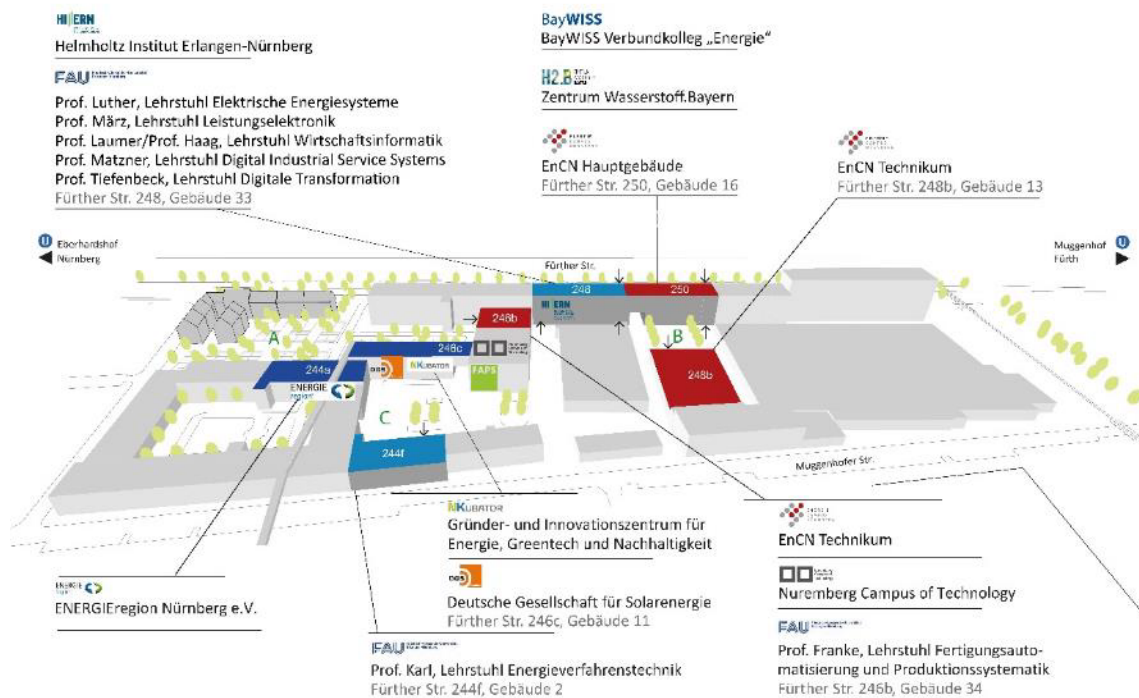


Abbildung 5: Der EnCN befindet sich in der Nürnberger Weststadt, auf dem ehemaligen AEG Gelände, direkt an der Fürther Straße.

Netzwerk

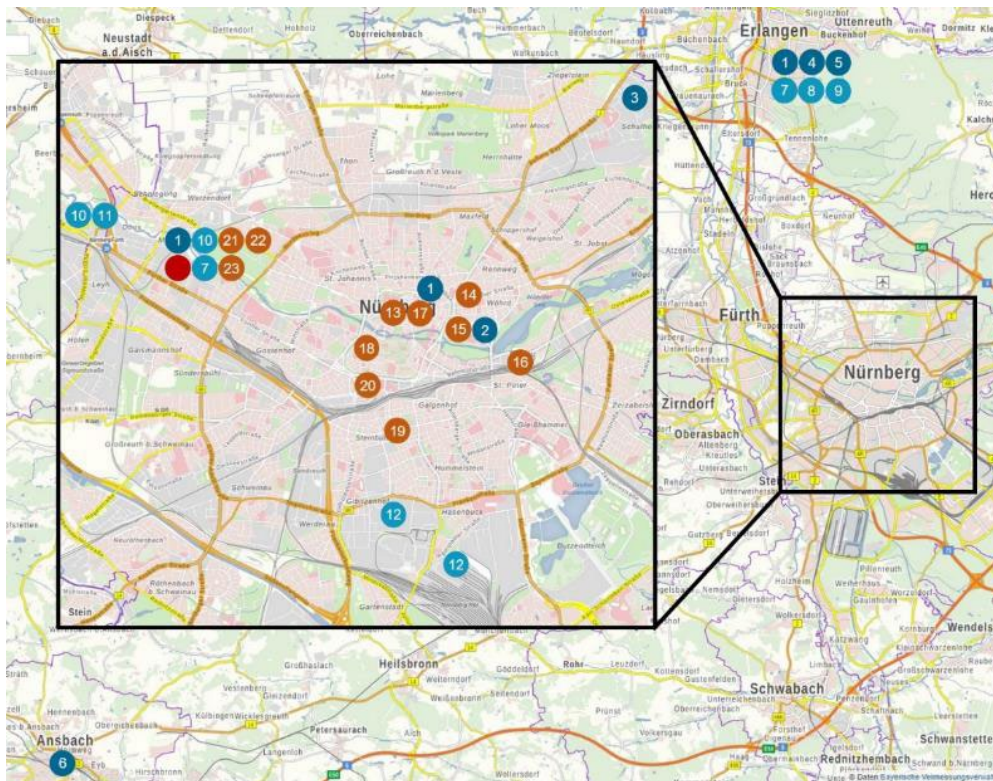
Der EnCN ist mit zahlreichen Institutionen, Industriebetrieben, Energieprojekten und –initiativen in der Region vernetzt und arbeitet eng mit diesen zusammen.



Abbildung 6: Auswahl an Veranstaltungen mit Netzwerkpartnern

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die wichtigsten Netzwerkpartner.



Energie Campus Nürnberg EnCN

EnCN Partner

- 1 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- 2 Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
- 3 Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
- 4 Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
- 5 ZAE Bayern
- 6 Hochschule Ansbach

Wissenschaftliches Netzwerk

- 7 Helmholtz Institut Erlangen-Nürnberg
- 8 Cluster of Excellence Engineering of Advanced Materials EAM
- 9 Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies SAOT
- 10 Nuremberg Campus of Technology NCT
- 11 Zentralinstitut für neue Materialien und Prozesstechnik ZMP
- 12 Technische Universität Nürnberg TUN

Netzwerkpartner

- 13 Industrie- und Handelskammer Mittelfranken IHK
- 14 Handwerkskammer Mittelfranken HWK
- 15 Verband Deutscher Ingenieure VDI
- 16 Bayern Innovativ
- 17 Nürnberger Initiative für die Kommunikationswirtschaft NIK
- 18 JOSEPHS – das offene Innovationslabor
- 19 European Center for Power Electronics ECPE
- 20 ZOLLHOF Tech Incubator
- 21 ENERGIEregion Nürnberg
- 22 Energietechnologisches Zentrum etz
- 23 Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie dgs

Abbildung 7: EnCN Netzwerk in der Region

Rückblick 2022

Die Wissenschaftliche Leitung hat auch im Jahr 2022 die Weiterentwicklung des EnCN vorangetrieben. Der Forschungsverbund soll sowohl für den Wissenschaftsstandort einen Nutzen generieren als auch allen anderen Stakeholdern, wie der regionalen Wirtschaft. Die zentralen Bausteine der Zusammenarbeit am EnCN sind die wissenschaftliche Kooperation, der Technologietransfer und die Gründeraktivitäten, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die Öffentlichkeitsarbeit mit Netzwerkaktivitäten und Veranstaltungen. Diese vier Handlungsfelder stellen den Tätigkeitsrahmen des EnCN dar und bilden die Grundlage für die Schaffung eines Mehrwerts durch gemeinsame Forschung.

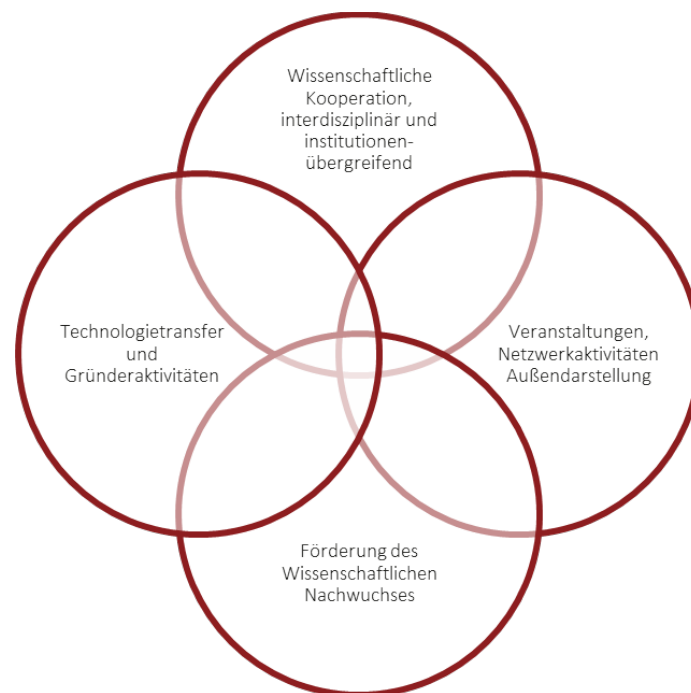


Abbildung 8: Zentrale Handlungsfelder des EnCN

Nachfolgend sind die Aktivitäten zu den vier Handlungsfeldern im Berichtszeitraum zusammengefasst dargestellt.

Wissenschaftliche Kooperationen und Aktivitäten

Strukturbildende Verbundprojekte

Die Initiative des Energie Campus Nürnberg (EnCN) zielt darauf ab, die interdisziplinäre Kooperation und die inhaltliche Weiterentwicklung seiner Forschungsschwerpunkte zu fördern. Durch die Einrichtung von acht strukturfördernden Verbundprojekten wird insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs ermutigt, Forschungsanträge zu stellen und sein Netzwerk innerhalb des EnCN aus- bzw. aufzubauen. Diese Verbundprojekte, die eine Zusammenarbeit von mindestens zwei Institutionen aus dem EnCN-Umfeld erfordern, wurden durch einen detaillierten Antrags- und Begutachtungsprozess im Jahr 2021 ausgewählt. Sie tragen wesentlich zur Stärkung der Zusammenarbeit im EnCN bei. Die Antragssteller kommen aus verschiedenen Einrichtungen wie der FAU, THN, HS Ansbach und dem NCT, was die breite Basis und den interdisziplinären Ansatz des EnCN unterstreicht. Die Förderung dieser Projekte durch eine Anschubfinanzierung vom StMWK und die anschließende Einwerbung von Drittmitteln für die Projektdurchführung zeigen das Engagement und die Unterstützung für innovative Forschungsvorhaben im Bereich Energie.

Tabelle 2: Übersicht Strukturbildende Verbundprojekte

Projekt	Titel	Beteiligte Wissenschaftler
HypChEn	Plattform für eine hybride chemo-enzymatische Elektrosynthese von E-Fuels: HypChEn	Prof. Dr. Katharina Herkendell (FAU) Prof. Dr. Tanja Franken (FAU) Prof. Dr. Kathrin Castiglione (FAU) Prof. Dr. Maik Eichelbaum (THN) Prof. Dr. Frank Opferkuch (THN)
LOHC Schiff	LOHC - basierter elektrischer Antriebsstrang für die Binnenschifffahrt	Florian Bauer, MSc (FAU) Prof. Dr.-Ing. Stefan Will (FAU) Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz (THN)
MeOH-Reaktor	Experimentelle und modellbasierte Entwicklung eines absorptiven Plattenreaktors zur effizienten Synthese des chemischen Energiespeichers Methanol	Dr. Patrick Schühle (FAU) Prof. Dr. Martin Peter Elsner (THN)
OPVplus	Organische Photovoltaik-Folien mit schaltbarer Transparenz für Fenster und Glasfassaden energieeffizienter Gebäude	Dr. Andreas Distler (FAU) Prof. Dr. Wolfgang Heiß (FAU) Prof. Dr. Arno Dentel (THN) Prof. Dr. Roland Krippner (THN)
QuartierOpt	Weiterentwicklung von technisch-ökonomischen Modellen zur Optimierung der technischen Konfiguration und Betriebsführung von Quartieren.	Dr. Jonas Egerer (FAU) Prof. Dr. Arno Dentel (THN)
RegGus	CO ₂ -arme effiziente Gussproduktion unter Einsatz regenerativer Energieträger in volatilen Strommärkten	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller (FAU) Fabian Teichmann, M.Sc. (FAU) Prof. Dr. Wolfgang Schlüter (HSA)
Zeolith	Herstellung und Charakterisierung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren zur Anwendung in Sorptionsspeichern	Dr. Marcus Fischer (FAU) Prof. Dr. Wolfgang Krcmar (THN)
STEAM	Modellbasierte Optimierung von Zwangsdurchlaufverdampfern in der Kältetechnik	Prof. Dr. Frank Opferkuch (THN) Dr. Patric Müller (FAU)

Projekt Klimapakt2030plus

Das Projekt „Klimapakt2030plus“ repräsentiert ein ambitioniertes Vorhaben des Energie Campus Nürnberg (EnCN) und seiner Partner, das auf die Realisierung und Beschleunigung der Energiewende in der Metropolregion Nürnberg abzielt. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Stadt Nürnberg und die Unterstützung des BMBF nimmt das Projekt eine Vorreiterrolle in der Entwicklung und Implementierung nachhaltiger Energiekonzepte ein.

Im Zentrum des „Klimapakt2030plus“ steht die Schaffung eines digitalen Zwillings der Energieströme der Metropolregion, basierend auf dem erfolgreichen Vorgängerprojekt ESM-Regio. Dieser digitale Zwilling dient als innovatives Werkzeug, um komplexe Daten über Energieströme zu visualisieren, zu analysieren und zu simulieren, was eine effektive Planung und Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen ermöglicht.

Das Projekt verfolgt mehrere Schwerpunkte zur Unterstützung der Energiewende. Dazu gehören die Überarbeitung und Aktualisierung des Klimapakts der Europäischen Metropolregion Nürnberg, der Einsatz des digitalen Zwillings in verschiedenen Projekten des Reallabors „Transformation Energieversorgung“ und die Durchführung von Netzwerk- und Informationsaktivitäten im Rahmen des Reallabors „Transformation Gebäudebestand“. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die regionalen Kapazitäten für erneuerbare Energien auszubauen, die Energieeffizienz zu steigern und die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Die sozio-ökonomische Begleitforschung, durchgeführt von der Hafen City Universität, spielt eine entscheidende Rolle im „Klimapakt2030plus“. Sie dient dazu, die Effektivität der implementierten Maßnahmen zu evaluieren, Best Practices zu identifizieren und Handlungsempfehlungen für die Politik und weitere Akteure zu entwickeln. Ziel ist es, evidenzbasierte Strategien zu liefern, die eine schnelle und nachhaltige Transformation der Energieversorgung und des Gebäudebestands ermöglichen.

Mit einer umfassenden Förderung von 4,5 Mio. € vom BMBF und einer Projektlaufzeit bis November 2027 setzt „Klimapakt2030plus“ neue Maßstäbe in der regionalen Energiepolitik und -forschung. Das Projekt veranschaulicht das Engagement und die Innovationskraft des EnCN und seiner Partner, die Energiewende aktiv voranzutreiben und die Metropolregion Nürnberg als Modellregion für nachhaltige Energiekonzepte zu etablieren.

Konferenzen, Workshops und Projekttreffen

Aus den Reihen der EnCN-Forscher wurden zahlreiche nationale und internationale wissenschaftliche Veranstaltungen (Seminare, Projekttreffen, Workshops, Konferenzen) zu Forschungsthemen des EnCN organisiert und durchgeführt.

Tabelle 3: Von EnCN-Wissenschaftlern durchgeführte Workshops, Seminare und Konferenzen

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
21.03.	ELSYS Antriebsforum	THN ELSYS, Prof. Dr. Armin Dietz
25.07.	Kick-off Projekt EVEKT	Prof. Dr. Günter Kießling
05.-07.10.	Conference on Green Hydrogen – New Sustainable Energy and its Social Impact	LSTM e. V.
23.11.	Herbstsitzung Cluster Mechatronik	THN ELSYS, Prof. Dr. Armin Dietz
08. -09.12.	Next Generation Solar Energy Conference	FAU IMEET, Prof. Dr. Christoph Brabec
09.12.	DNAguss Projekttreffen	HS Ansbach, Prof. Dr. Wolfgang Schlüter



Abbildung 9: Conference on Green Hydrogen

Studien

Vertreter des EnCN erstellen immer wieder Studien im Auftrag der Politik, Wirtschaft oder Verbänden.

Studie „Wasserstoff in der Metropolregion Nürnberg – Analyse der Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen“

Im Auftrag der Stadt Nürnberg (115.000 € Förderung) wurde die Studie „Wasserstoff in der Metropolregion Nürnberg – Analyse der Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen“ erstellt. Die Studie wurde von einem Konsortium von Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, ENERGIEregion Nürnberg e.V. und Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS unter der Koordination des Energie Campus Nürnberg erstellt. Die Studie wurde am 3. März 2023 im Rahmen einer eigenen Pressekonferenz am EnCN vorgestellt und digital veröffentlicht (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7628146>).

Die Studie zeigt auf, dass die Metropolregion Nürnberg über ein robustes Wirtschafts- und Forschungscluster im Bereich spezifischer Wasserstoffschlüsseltechnologien verfügt. Dies positioniert die Region auf Rang 4 im deutschlandweiten Vergleich der Wasserstoffkompetenzen. Trotz eines aktuell geringeren Bedarfs an grünem Wasserstoff, insbesondere in energieintensiven Industriezweigen, unterstreicht die Studie die Notwendigkeit, infrastrukturelle Grundlagen für eine regionale Wasserstoffherzeugung zu schaffen. Dies dient nicht nur der Deckung zukünftiger Bedarfe im Schwerlastverkehr

und der allgemeinen Energieversorgung, sondern auch der Stärkung der regionalen Wirtschaft durch innovative Technologien.

Die Bedeutung dieser Studie für die Region liegt nicht nur in der Identifikation des Potenzials von Wasserstoff, sondern auch in der Darstellung von Wegen, wie dieses Potenzial realisiert werden kann. Durch den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur und die Förderung der regionalen Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien kann die Metropolregion Nürnberg eine führende Rolle in der Wasserstofftechnologie einnehmen. Dies eröffnet neue Wirtschaftszweige und schafft zukunftsfähige Arbeitsplätze, während gleichzeitig die Energiewende vorangetrieben wird.

Die Durchführung der Studie wurde von einem Konsortium aus renommierten Institutionen und Organisationen übernommen. Diese Zusammenarbeit verschiedener Akteure zeigt die Stärke der regionalen Vernetzung des EnCN und die Bedeutung einer kooperativen Herangehensweise.

Weitergehende Forschungsprojekte

Im Berichtszeitraum haben die Wissenschaftler am EnCN zahlreiche Drittmittel und weiterführende Projekte eingeworben, die einen direkten Bezug zu den Forschungstätigkeiten am EnCN haben.

Tabelle 4: Laufende Großprojekte mit Bezug zum EnCN

Projekt	Kurzbeschreibung	Koordinator
SFB/Transregio 154 Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken	2018 wurde der seit 2014 laufende TRR 154 verlängert. Verschiedene Wissenschaftler aus dem EnCN kooperieren in diesem Verbundprojekt mit Forschern der TU Berlin, der HU Berlin und der TU Darmstadt. In diesem Projekt werden unter anderem auch Erkenntnisse aus den Arbeiten des Bereichs Energiemarktdesign am EnCN genutzt.	Prof. Alexander Martin
LOHC-Zugprojekt am HI ERN	HI ERN erhält den Förderbescheid vom StMWi für 5 Jahre, um in einem Demonstrationsprojekt einen LOHC-betriebenen Zug zu entwickeln. Hierfür greift das HI ERN auch auf Vorarbeiten aus dem EnCN zurück.	Prof. Peter Wasserscheid
Kopernikus Ensure	ENSURE erforscht innovative Lösungen, um das Stromnetz für die Zukunft fit zu machen. Dabei wird ein modularer Ansatz für zukünftige Netzstrukturen verfolgt. Die Sektorenkopplung wird ebenfalls bedacht.	Prof. Matthias Luther
Kopernikus P2X	P2X erforscht verschiedene Optionen, Gase, Flüssigkeiten und Chemikalien auf Basis von Strom herzustellen. Schwerpunkt lag auf Wasserstoff und einem Synthesegas, das aus einer Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid besteht.	Prof. Peter Wasserscheid

Technologietransfer und Gründeraktivitäten

Neben der wissenschaftlichen Arbeit selbst ist Technologietransfer ein wichtiger Baustein am EnCN. Gestaltung der Energiewende bedeutet auch, technologische Lösungen schnellstmöglich in die Anwendung zu bringen. Dies erfolgt über Forschungsprojekte entweder direkt mit Unternehmen oder über drittmittelfinanzierte Projekte des Bundes oder der EU gemeinsam mit anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen, wobei der Fokus auf Technologietransfer und Demonstration von Technologien im industriellen Maßstab liegt.

Gründeraktivitäten

Am EnCN Standort „Auf AEG“ wurde 2020 der NKubator – ein Innovations- und Gründerzentrum für Energie, GreenTech und Nachhaltigkeit von der Stadt Nürnberg, der ENERGIEregion Nürnberg, dem FAU Lehrstuhl FAPS und dem EnCN gegründet. Mit dem NKubator werden Wissenschaftler einfach und effizient bei Ausgründungen unterstützt, aber auch Start-ups und etablierte Unternehmen erhalten Unterstützung für alle Themen rund um nachhaltiges Wirtschaften und Unternehmensgründungen. Durch die systematische Vernetzung von Gründungswilligen, Forschungseinrichtungen und bestehenden Unternehmen kann die Wettbewerbsfähigkeit der Region verbessert werden. Der EnCN unterstützt diese

Aktivitäten mit einem entgeltlichen Zugang zu Forschungsinfrastruktur, Vernetzungsaktivitäten zwischen Gründern und Wissenschaftlern, sowie der Beratung der Gründer.

Beispielhaft ist die Förderung des Start-ups Amperial durch die EnCN Geschäftsstelle zu benennen. Das Start-up, welches sich auf fortschrittliche Energielösungen spezialisiert hat, kommt aus dem Forschungskosmos der FAU und des EnCN. Die Geschäftsstelle bietet Start-ups wie Amperial nicht nur Zugang zu einem breiten Netzwerk von Fachexperten und potenziellen Investoren, sondern unterstützt sie auch durch Beratungsleistungen und Workshops. Diese Maßnahmen sollen Gründern helfen, ihre Geschäftsmodelle zu verfeinern, ihre Technologien zur Marktreife zu bringen und erfolgreiche Unternehmen aufzubauen, die einen nachhaltigen Einfluss auf die Energiebranche und einen wichtigen Baustein für die Energiewende darstellen.

Die FAU Gründungsberatung veranstaltete am 24.11.2022 im EnCN eine Abschlussveranstaltung zum Studierendenwettbewerb 5 Euro Business zusammen mit dem bbw e.V. Verband. Das wesentliche Ziel des 5-Euro-Business-Wettbewerbs ist es, Gründungsgeist zu wecken und Studierende zu motivieren, sich mit dem Thema Start-up auseinanderzusetzen. In einer realen und gleichzeitig spielerischen Situation sammeln die Teilnehmer:innen erste Praxiserfahrungen und erweitern ihre beruflichen Perspektiven. Unternehmerisches Denken und Handeln werden angeregt und geübt.

Nachwuchsförderung

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses spielt eine wichtige Rolle am EnCN. Sie wird auf allen Ebenen gezielt gefördert. Durch umfangreiche Lehrangebote, Auszeichnungen für exzellente Leistungen und frühzeitige Einbindung in die interdisziplinären Forschungsstrukturen am EnCN wird die Wissenschaftsausbildung weiter vorangetrieben.

EnCN-Energiepreis und EnCN-Reisestipendium

Seit 2017 werden herausragende Abschlussarbeiten (Bachelor und Master), die im Umfeld des EnCN angefertigt wurden mit einem Energiepreis geehrt. Viele der ausgezeichneten Studierenden haben nach ihrem Studium einen wissenschaftlichen Weg eingeschlagen und am EnCN weitergearbeitet bzw. promoviert. Informationen zu den Preisträgern sind im Projektbericht der Geschäftsstelle dargestellt. Des Weiteren wurde ein Reisestipendium ausgelobt, das die Wissenschaftler:innen bei der Teilnahme an internationalen Konferenzen finanziell unterstützt.

Bayerisches Wissenschaftsforum (BayWISS)

Einen weiteren Baustein der vernetzten Nachwuchsförderung stellen kooperative Promotionen über das BayWISS Verbundkolleg Energie dar. Es bietet einen geeigneten Rahmen, um Promotionen im Kontext gemeinsamer Forschungsaktivitäten zwischen den Hochschulen zu betreuen und ermöglicht den Promovierenden eine weitergehende Vernetzung untereinander. 2017 wurde das BayWISS Energie von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, der Technischen Hochschule Nürnberg sowie der Ostbayerisch Technischen Hochschule Amberg-Weiden ins Leben gerufen. Es unterhält eine Geschäftsstelle in den Räumen des EnCN.

Kooperation mit dem Willstätter Gymnasium und dem Schülerforschungszentrum

Die Zukunft von jungen Menschen wird stark durch ihre Ausbildung und Erfahrungen geprägt. Der EnCN möchte aktiv Schüler:innen unterstützen, sich durch Vorträge und Führungen weiterzubilden, aber auch eine Entscheidungshilfe zu erhalten, welche wissenschaftlichen Gebiete sie für ihre weitere Hochschulausbildung interessieren könnten.

Seit mehreren Jahren organisiert der EnCN für Schüler:innen des Hochbegabten Modells Mittelfranken Vorträge und Führungen zu aktuellen Themen der Energieforschung Auf AEG. Aber auch weitere Schulen im Raum Nürnberg sind wiederholt an den EnCN herangetreten, woraus sich verschiedene Kooperationen entwickelt haben, die Schülerinnen und Schüler schon früh an die Energieforschung heranzuführen. Im Herbst besuchten uns Lehrer:innen des Willstätter Gymnasiums Nürnberg, um weitere Möglichkeiten einer Zusammenarbeit mit dem EnCN, aber auch mit dem Nuremberg Campus of Technology, (NCT) zu eruieren. Neben verschiedenen Vorträgen erhielten die Lehrer:innen einen Einblick in die Forschungsarbeit und Labore. So besuchten sie z.B. die Solarfabrik der Zukunft und das Speicherhaus am EnCN und die Roboterautomatisierung des NCT.



Abbildung 10: Laborführung der Lehrer:innen des Willstätter Gymnasiums

Nürnberger KinderUni am EnCN

Das Kulturreferat der Stadt Nürnberg und die FAU organisieren jedes Jahr die KinderUni, bei der auch Wissenschaftler aus dem EnCN mehrmals im Jahr ihre Forschungsthemen kindgerecht präsentieren.



Abbildung 11: KinderUni am EnCN

Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit

Online Veranstaltungen zur Reihe „Frag den Experten“

Infolge der vielen Diskussionen zum Thema Energieeinsparung wurde 2022 die Online-Veranstaltungsreihe „Frag den Experten“ ins Leben gerufen, um der breiten Öffentlichkeit den Beitrag des EnCN zu diesem Thema näher zu bringen. In Summe gibt es 10 Veranstaltungen.

Tabelle 5: Vorträge 2022

Innovative Technologien für dezentrale intelligente Energiesysteme	Dr. Richard Öchsner, Fraunhofer IISB
Höherauslastung der Stromnetze am Beispiel von Netzboostern	Johannis Porst, FAU, Lehrstuhl Elektrische Energiesysteme

Jubiläumsveranstaltung

Der EnCN feierte von 2021 – 2022 zusammen mit der ENERGIEregion und dem Nkubator sein 10-jähriges Jubiläum. Unter dem Jubiläums-Motto „Kompetenzen aus der Region für eine nachhaltige (Energie)Zukunft“ wurde über ein Jahr verteilt die Vielfalt der Aktivitäten der Jubilare vorgestellt. Von Juni 2021 bis Juni 2022 fanden dazu eine Auftaktveranstaltung, drei Fachveranstaltungen und eine Abschlussveranstaltung statt.

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET



Abbildung 12: Impressionen der Abschlussveranstaltung

Im März 2022 wurde die Fachveranstaltung Energiesysteme und Nachhaltigkeit organisiert. Prof. März war der fachliche Impulsgeber und diskutierte mit infra fürth aktuelle Themen. Des Weiteren wurden Beiträge von Siemens Energy, Cenero, Südwert, der FAU und dem Bayerischen Zentrum für Batterietechnik geplant.

Die dritte Fachveranstaltung Wärmewende und energieeffiziente Gebäude wurde im Mai 2022 organisiert. Der fachliche Impulsgeber war Prof. Krcmar.

Der Höhepunkt des Jubiläumsjahrs bildete im Juni 2022 die Abschlussveranstaltung, erstmalig wieder in Präsenz. Nach langer Coronapause wollten wir den regionalen Akteuren die Möglichkeit zu einem aktiven Austausch und Networking geben. Im Vorfeld der Veranstaltung konnten die Teilnehmer die Labore des EnCN besichtigen.



Abbildung 13: Impressionen der Laborbesichtigungen im Rahmen der Jubiläumsveranstaltung

Besuche am EnCN

Regelmäßig besuchen Wirtschafts-, Wissenschafts- oder politische Vertreter aus verschiedenen Ländern den EnCN. Der Informations- und Wissensaustausch bringt sowohl den Delegierten einen Mehrwert als auch den Vertretern des EnCN, indem sie Anforderungen und Herausforderungen im Energiebereich aus verschiedenen Ländern erfahren.

Tabelle 6: Ausländische Delegationsbesuche

Delegationen
Tunesien
Niederlande
Indien
Chile
Kenia
Kuba
Südamerika
Mittelamerika

VERTRAULICH – WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET



Abbildung 14: Delegationen aus Kenia (links) und aus Tunesien (rechts)

Gern wird der EnCN von politischen Delegationen und Mitgliedern des Landtags bzw. Bundestags besucht, um sich über den aktuellen Stand der Energieforschung zu informieren oder um sich fachlich auszutauschen. Der EnCN genießt durch seine Neutralität und Fachexpertise hohes Ansehen. Dieses Jahr besuchte uns das Präsidium des Bayerischen Landtages und informierte sich über aktuelle Trends in der Energieforschung.



Abbildung 15: Besuch des Präsidiums des Bayerischen Landtages

Betriebsratsmitglieder der Mainova AG und N-ERGIE AG besuchten den EnCN für einen Erfahrungsaustausch und lernten die aktuellen Themen der Energieforschung kennen. Durch verschiedene Laborführungen erhielten sie einen guten Einblick in unsere innovative Forschungsarbeit.

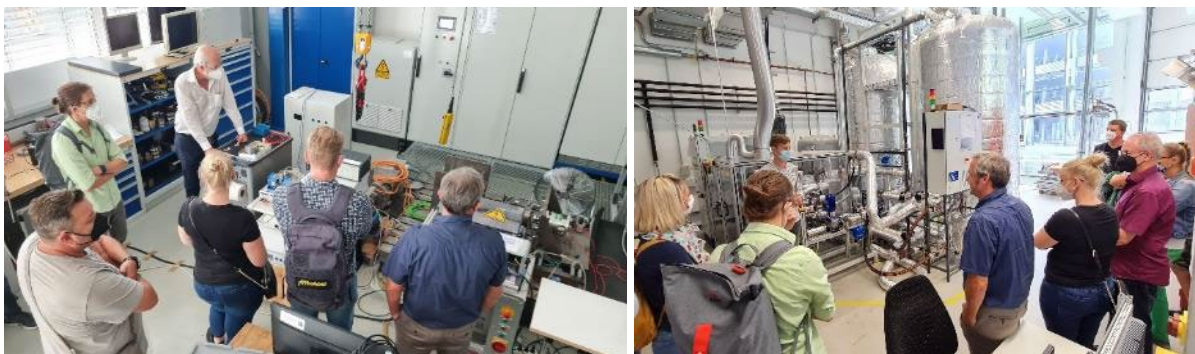


Abbildung 16: Laborbesichtigungen der Mainova und N-ERGIE

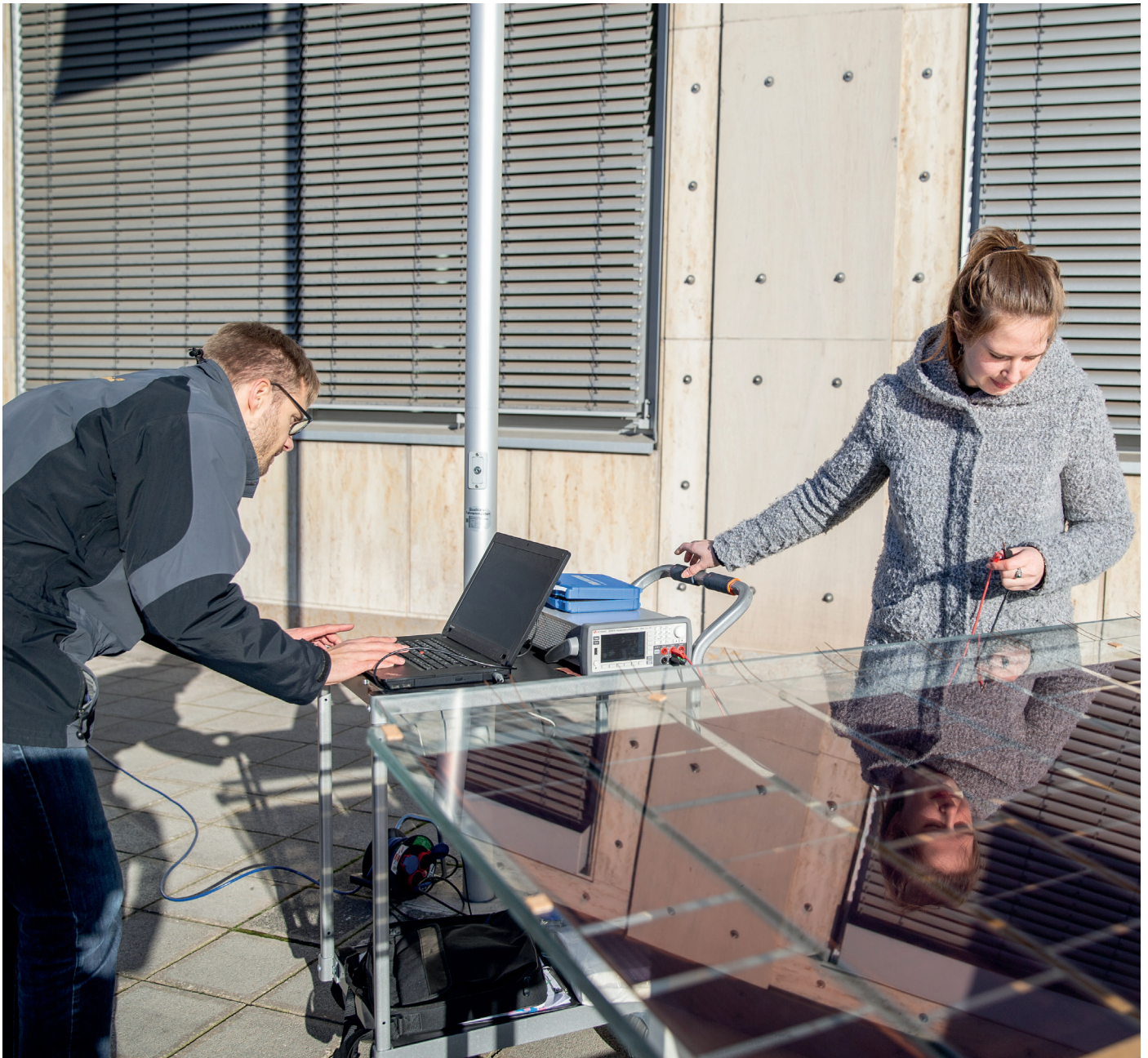
Ausblick 2023

Der strategische Schwerpunkt im Jahr 2023 liegt auf der Verstetigung des EnCN. Dies beinhaltet die Transformation des ursprünglich vom Wirtschaftsministerium geförderten Projekts in eine dauerhafte, institutionsübergreifende Forschungsplattform. Diese Entwicklung erfordert eine Anpassung der Organisationsstruktur, um Effizienz, Kooperation und eine lebendige Forschungsgemeinschaft zu gewährleisten. Die Überführung in eine solche Plattform ermöglicht es dem EnCN, langfristige Ziele zu verfolgen und einen nachhaltigen Beitrag zur Energieforschung zu leisten.

Darüber hinaus ist die Generierung neuer Dienstleistungen ein wesentlicher Bestandteil der Zukunftsstrategie des EnCN. Durch die Entwicklung neuer Dienstleistungen kann der EnCN und die Geschäftsstelle seinen Anwendungsbereich erweitern und neue Einnahmequellen erschließen. Dies umfasst nicht nur die Unterstützung der Industrie durch Forschung und Entwicklung, sondern auch die Bereitstellung von Beratungsdiensten, die Förderung von Start-ups und die Entwicklung von Weiterbildungsangeboten. Somit soll die Möglichkeit für eine Teilfinanzierung der Kosten der Geschäftsstelle geschaffen werden.

Im Energie Campus Nürnberg wird die Zukunft der Forschung durch eine gezielte Förderung von Nachwuchswissenschaftlern gestaltet. Die Vergabe von Forschungsmitteln folgt dieser strategischen Ausrichtung und konzentriert sich darauf, innovative und richtungsweisende Projekte aus allen Bereichen der Energiekette zu unterstützen. Antragsberechtigt sind Nachwuchswissenschaftler, die institutsübergreifende Forschung voranbringen wollen. Diese Fokussierung gewährleistet nicht nur die Entwicklung von bahnbrechenden Forschungsprojekten, sondern fördert auch die Karriere junger Forschenden und stärkt die Forschungsgemeinschaft am EnCN. So bleibt der Energie Campus Nürnberg ein Zentrum der Spitzenforschung zu allen wichtigen Energiethemen.

Strukturfördernde Verbundprojekte



Projektleiter

Dr. Thomas Pircher
Energie Campus Nürnberg

E-Mail
Thomas.Pircher@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 99126

Web
www.encn.de

1 Strukturfördernde Verbundprojekte

Im Berichtszeitraum standen dem EnCN insgesamt 400.000 € zur Anschubfinanzierung von insgesamt acht „Strukturfördernden Verbundprojekten“ zur Verfügung. Vorrangiges Ziel der Förderung ist die Stärkung der Zusammenarbeit der am EnCN beteiligten Institutionen und dabei die gezielte Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Die geförderten Projekte sollen die inhaltliche Weiterentwicklung der Forschungsschwerpunkte am EnCN unterstützen und den Nachwuchs-Wissenschaftler:innen den Aus- und Aufbau ihres Netzwerks ermöglichen. Es konnten ausschließlich Verbundprojekte beantragt werden, an denen Wissenschaftler:innen von wenigstens zwei Hochschulen beteiligt sind. Die Mitglieder der Wissenschaftlichen Leitung des EnCN waren infolge ihrer Funktion als Gutachtergremium von der Antragstellung ausgeschlossen. Die Projekte mussten einem der Forschungsschwerpunkte am EnCN zugeordnet werden können, nämlich „Wasserstoff, E-Fuels und Anwendungen“, „Energieeffiziente Gebäude“ oder „Intelligente Energiesysteme“. Außerdem sollen die Projekte einen positiven Strukturbildungseffekt am EnCN bewirken und die institutionsübergreifende Zusammenarbeit am EnCN fördern und stärken. Bei erfolgreichem Verlauf können die Projekte als Nukleus für weiterführende Verbundprojekte wirken, die über allgemein zugängliche Förderkulissen zu beantragen sind. Die Projekte müssen in den Räumen des EnCN durchgeführt werden und sollen eine Laufzeit von 1 bis 3 Jahren haben.

2 Vorstellung der „Strukturfördernden Verbundprojekte“

Projekt 1: Plattform für eine hybride chemo-enzymatische Elektrosynthese von E-Fuels (HypChEn)

Verbundpartner

Prof. Dr. Tanja Franken, Juniorprofessorin f. Katalytische u. Elektrokatalytische Systeme u. Verfahren (FAU, Nachwuchsw.)

Prof. Dr. Katharina Herkendell, Juniorprofessorin für Dezentrale Energieverfahrenstechnik (FAU, Nachwuchsw.)

Prof. Dr. Kathrin Castiglione, Professorin für Bioverfahrenstechnik (FAU)

Prof. Dr. Maik Eichelbaum, Professor für Analytische Chemie (THN)

Prof. Dr. Frank Opferkuch, Professor für Dezentrale Energiewandlung und Speicherung (THN)

Beantragte Gesamtfördersumme: 730.250 €

Mit den ambitionierten Zielen der Bundesregierung, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu sein und danach sogar Negativemissionen zu erzeugen, wird eine Dekarbonisierung des Energiesektors angestrebt. Leider sind viele Anwendungen in den Sektoren straßengebundener Schwertransport, Schiff- und Luftfahrt nicht oder nur mit größten Herausforderungen zu dekarbonisieren. Das heißt, insbesondere für solche Anwendungen werden auch in Zukunft große Mengen flüssiger (nicht-fossiler) Energieträger, die so genannten „e-fuels“, mit hoher volumetrischer Energiedichte zu moderaten Preisen benötigt. Eine vielversprechende Schlüsseltechnologie ist die Elektrosynthese, die eine energie- und kosteneffiziente Synthese von e-fuels aus atmosphärischem/biogenem CO₂ und in situ generiertem, grünem H₂ ermöglicht. Über die Verknüpfung der Wasserspaltung an der Anode und direkter Weiterverwendung der Protonen in der kathodischen Reduktion von CO₂ muss kein H₂ zwischengespeichert werden und die notwendige regenerative Energie wird direkt, ohne Wärmeverluste über die Elektroden zugeführt. Derzeit sind die Kathodenkonzepte zur selektiven Reduktion von CO₂ zu e-fuels, im Gegensatz zur anodischen Wasserspaltung, noch sehr unausgereift. Bisher können an klassischen heterogenen Elektrokatalysatoren nur CO und Ameisensäure/Formiat mit ausreichender Faraday'scher Effizienz und niedriger Überspannung aus CO₂ hergestellt werden. Flüssige e-fuels mit hoher Energiedichte wie Methanol oder höherwertige Kohlenwasserstoffe und Alkohole können derzeit nur sehr unselektiv und mit hohen Überspannungen an klassischen heterogenen Elektrokatalysatoren aus CO₂ hergestellt werden. Daher ist die elektrochemische CO₂-Umwandlung heute praktisch auf C1-Energieträger wie Methanol, Methan und Ameisensäure beschränkt. Die für technische Anwendungen unzureichende Standfestigkeit der bekannten Katalysatoren von derzeit nur wenigen 100 h

und die mangelhafte Selektivität der elektrokatalytischen Reaktion führen zu aufwendigen Aufbereitungsschritten des Produkts und zur regelmäßigen Erneuerung des Katalysators. Damit lässt sich zusammenfassen, dass die bekannten elektrochemischen Syntheseverfahren nach aktuellem Stand mit hohen Herstellungskosten verbunden sind. Die auf diesem Weg erzeugten Energieträger können daher aus heutiger Sicht nicht zu einem marktkonformen Preis dargestellt werden. Biokatalytische Routen zu e-fuels über enzymatische Katalysatoren sind im Gegensatz zu klassischen Elektrokatalysatoren für ihre sehr hohen Produktselektivitäten bekannt. Durch eine gezielte Wahl von Enzymen werden Kaskaden hochselektiver Reaktionen initiiert, die zum gewünschten Produkt führen. Ein besonderer Vorteil gegenüber heterogenen Elektrokatalysatoren ist die Möglichkeit, sehr selektiv auch C-C-Kopplungsreaktionen unter sehr milden Reaktionsbedingungen zu initiieren.

Zielsetzung und Arbeitspakete

Typischerweise werden die verschiedenen Schritte der H_2 -Erzeugung, enzymatischen CO_2 -Aufwertung bzw. enzymatischen Weiterverwendung von heterogen katalytisch erzeugten Intermediaten und der katalytischen Cofaktorregeneration in unterschiedlichen Reaktionsräumen durchgeführt. In diesem Verbundprojekt sollen die Vorteile der schnellen Reaktionsraten klassischer elektrochemischer Katalysatoren mit den Vorteilen der hohen Selektivitäten von enzymatischen Systemen kombiniert und in nur einer einzigen Elektrosynthesezelle vereint werden. Dafür werden im vorliegenden interdisziplinären Vorhaben nanostrukturierte hybride Kathodenmaterialien entwickelt, welche auf ihrer Oberfläche elektrochemische und enzymatische Funktionen vereinen. Im Verlauf dieses Projekts wird eine im Durchfluss betriebene Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolysezelle ausgelegt und in Betrieb genommen. Diese generiert an der Anode Elektronen und Protonen, welche an der Kathode zur Reduktion des CO_2 und Cofaktorregeneration verwendet werden. Zur Demonstration des hybriden chemo-enzymatischen Elektrosynthese-Ansatzes stehen zwei Konzepte im Vordergrund, welche eine Plattform für die effiziente und selektive Elektrosynthese weiterer e-fuels eröffnen.

Arbeitspakete

AP 1 (Tanja Franken, FAU): Synthese nanostrukturierter Kohlenstoffträger und heterogen katalytische Funktionalisierung

Zur gezielten Einstellung der Mikroreaktionsumgebungen für die hybriden chemo-enzymatischen Elektrokatalysatoren werden geordnete mesoporöse Kohlenstoffträger über einen in der Gruppe auch für andere Materialien etablierten Templatisierungsansatz mit SiO_2 als Templat hergestellt. Dieser Ansatz wird auch mit nanopartikulären SiO_2 -Templaten zur Generation von Sackporen limitierter Größe im Kohlenstoffträger durchgeführt. Durch Variation der Porendurchmesser und -geometrie der Kohlenstoffträgerstrukturen wird untersucht, was die optimale Porengeometrie für die hybriden chemo-enzymatischen Kathoden in der CO_2 -Reduktion ist, um einerseits die einzelnen involvierten Reaktionen in diesem Mikroreaktionsraum zu ermöglichen und andererseits Stoff- und Elektronentransportvorgänge zu maximieren. Heterogenkatalytisch funktionalisiert werden die Kohlenstoffträger durch vorheriges Trägern aktiver Metalle auf den SiO_2 -Templaten. Nach der Templat-Entfernung bleiben die Metalle im Innern der Porenstruktur zurück. In AP 3 werden die hergestellten Materialien mit verbesserten Enzymen aus AP 2 funktionalisiert und elektrochemisch getestet. Die chemische und textuelle Analyse erfolgt durch Elementaranalyse, N_2 -Physisorption, Kleinwinkel-Röntgenpulverdiffraktometrie und Transmissionselektronenmikroskopie. Für geeignete Materialkombinationen wird ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, das Elektrodenmaterial direkt in der Membran-Elektroden-Einheit der PEM-Elektrosynthesezelle aus AP 4 einzusetzen.

AP 2 (Kathrin Castiglione, FAU): Synthese, Optimierung und Charakterisierung maßgeschneiderter Biokatalysatoren

Für die hybride Synthese von CO_2 zu Methanol, werden durch Genome Mining und Protein Engineering neue Enzym-Varianten mit vorteilhaften Eigenschaften bezüglich Stabilität und Aktivität identifiziert und mit dem bislang besten bekannten Enzym verglichen. Für eine optimale Immobilisierung der Enzyme auf den nanostrukturierten Kohlenstoffträgern werden diese auf genetischer Ebene an geeignete Solid Binding Peptides fusioniert und hinsichtlich ihrer Immobilisierung vergleichend analysiert. Zusätzlich werden Co-Lokalisierungsansätze auf der Basis von kovalenten Verknüpfungen enzymatischer Domänen über SpyTag-SpyCatcher-Systeme evaluiert. Die jeweils besten,

maßgeschneiderten Enzym-Varianten werden kontinuierlich für die weiterführenden Arbeiten der Projektpartner mit Hilfe mikrobiologischer Expressionssysteme produziert und anschließend gereinigt. In iterativen Design-Build-Test-Learn-Zyklen wird so eine optimierte Enzym-Kaskade etabliert.

AP 3 (Katharina Herkendell, FAU): Biofunktionalisierung der Träger, Optimierung der elektrischen Kontaktierung und Performance der Multienzym-Kaskaden

Die plattformspezifische Biofunktionalisierung der gefertigten Kathodenstruktur aus AP 1 erfolgt über die gezielte Immobilisierung der Enzymkaskaden (AP 2) und Cofaktoren in der 3D Elektrodenstruktur mittels etablierter Adsorptions-, Bindungs- und Crosslinking-Verfahren. Die Kombination der nanostrukturierten Kohlenstoffmatrix mit prozessspezifisch vernetzten Enzymen führt zu integrierten bioelektrochemisch aktiven Systemen. Durch anschließende Halbzelltests mit einfachen Dreielektroden-Konfigurationen im 20 ml-Maßstab werden Iterationen zur Abstimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der modifizierten Kathodenoberflächen durchgeführt. Parallel wird der Syntheseprozess im Inneren des Porensystems etabliert und in Wechselwirkung mit AP 1, 2 und 4 für maximale Produktionsraten ausgelegt. Die Datenerfassung für AP 5 erfolgt synchron. Die elektrochemische Charakterisierung erfolgt mittels cyclovoltammetrischen, potentiometrischen und impedanzspektroskopischen Untersuchungen. Die Umwandlungsraten der einzelnen Katalyseschritte werden spektroskopisch mittels enzymatischer Assays und mittels Gaschromatographie bestimmt. In enger Abstimmung mit AP 5 werden optimierte, skalierbare Protokolle zur Oberflächenfunktionalisierung und –analytik für die Testung in AP 4 erstellt.

AP 4 (Maik Eichelbaum, THN): Aufbau, Steuerung und Charakterisierung einer PEM-CO₂-(H₂O-Co) Elektrolyseplattform

Ziel ist die Entwicklung und Konstruktion eines skalierbaren, reproduzierbaren dreiteiligen Zelldesigns für die Implementierung der in AP 1, 2 und 3 entwickelten und dort erfolgreich konzeptionell getesteten Kathodenstrukturen mit immobilisierten Enzymkaskaden, Cofaktoren und/oder Mediatormolekülen in einer voll funktionsfähigen elektrochemischen PEM-CO₂-Elektrolysezelle zur Elektrosynthese eines e-fuel-Vorläufers. Ausgangspunkt ist ein Zellkonzept in Anlehnung an eine geeignete Elektrolysezelle, angepasst an die für die enzymatische Katalyse und ggf. Cofaktorregeneration notwendigen Betriebsbedingungen. Die elektrosynthetisierten Produkte wie u.a. Methanol werden über ein geeignetes Pumpverfahren kontinuierlich aus dem Elektrolyt-Medium ausgespült und analysiert. Gasförmiges CO₂ wird über einen digitalen Massenflussregler kontrolliert in die Kathode geleitet sowie deionisiertes Wasser über eine entsprechende Pumpe durch die Anodenseite gepumpt. Die elektrochemische Charakterisierung und Steuerung der Zelle erfolgt über einen an die Stromkollektoren angeschlossenen Potentiostaten/Galvanostaten. Dieser Aufbau ermöglicht auch die in situ Charakterisierung der Elektroden durch die systematische Aufnahme von Polarisationskurven, Cyclovoltammogrammen und elektrochemischen Impedanzspektren in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen einschließlich der Berechnung erzielter Wirkungsgrade, Umsätze und Selektivitäten durch zeitgleiche Korrelation mit der Analyse der Edukte und Produkte. Darüber hinaus durchgeführte Lebenszyklus-Analysen und Vergleiche mit klassischen Systemen sowie Konzepte zur Skalierung komplettieren dieses AP.

AP 5 (Frank Opferkuch, THN): Simulation der Elektrosynthese, Modulation der Prozessketten und Techno-Ökonomische Bewertung

Durchführung projektbegleitender techno-ökonomischer Betrachtungen der einzelnen Prozessschritte (Unit Operations) und des gesamten verfahrenstechnischen Prozesses mit dem Ziel einer projektbegleitenden Kostenabschätzung auf Basis der Simulation. Beginnend bei der Modellierung und Simulation der elektrochemischen Synthesereaktion in der PEM-Zelle soll durch eine laufende Anpassung an die aktuellen Versuchsdaten ein anwendungsnahes, verfahrenstechnisches Modell der gesamten Prozesskette aufgebaut werden. Modellierung und Simulation haben zum Ziel, die Gesamt-Investitionen und die Gesamt-Effizienzen bei der Herstellung darzustellen, kostensensitive Parameter zu ermitteln und im Vorhaben damit eine Entwicklung im Sinne eines Design-to-Cost Ansatzes zu erleichtern. Mit den Methoden der objektorientierten Modellierung in DYMOLA werden Verhaltensmodelle der multiphysikalischen Prozesse bei der Synthese und der Stofftrennung erstellt und ein Energie- und Kostenfluss von der Primärenergiequelle (Strom) bis zum aufbereiteten Produkt dargestellt. Durch den Einsatz von Komponenten-Bibliotheken können in der zum Einsatz

kommenden Simulations-Plattform die Prozesskette leicht angepasst und optimiert werden. Durch Darstellung der zu entwickelnden neuen Verfahren und Prozesse und durch Vergleich mit klassischen Syntheserouten können die KPI dieser Prozesse wie Effizienz, Selektivität, Stabilität, Sensibilität und Kosten vergleichbar ermittelt und für Bewertungen im Sinne einer Prozessoptimierung herangezogen werden.

Projekt 2: LOHC – basierter elektrischer Antriebsstrang für die Binnenschifffahrt (LOHC)

Verbundpartner

M.Sc. Florian Bauer, Lehrstuhl für technische Thermodynamik (LTT, FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz, Institut für Leistungselektronische Systeme (ELSYS, THN)

Geplante Gesamtfördersumme: 598.000 €

Projektbeschreibung

Im Zuge der Umsetzung von nötigen Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele stellt die Reduktion der CO₂-Emissionen im Schiffsverkehr eine aktuelle Herausforderung dar. In der Binnenschifffahrt (Frachter, Ausflugsdampfer, Sportboot) muss der zukünftige Ausstoß von Luftschadstoffen aufgrund regulatorischer und gesellschaftlicher Anforderungen reduziert werden. Eine Möglichkeit, die erforderliche Energiemenge sicher und mit einer hohen gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte unter weitgehender Verwendung der bestehenden Infrastruktur zu speichern, stellen flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carrier – kurz: LOHC) dar. Die Realisierung eines LOHC-basierten Antriebsstrangs bietet somit eine vielversprechende Möglichkeit für eine CO₂ freie Binnenschifffahrt. Im Bereich der Seeschifffahrt gibt es bereits Ansätze, die LOHC Technologie als Antrieb einzusetzen. Des Weiteren wird das Ziel eines LOHC-basierten Antriebsstrangs auch im Bahnverkehr auf nicht-elektrifizierten Strecken im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht. Für die endotherme Reaktion zur Wasserstofffreisetzung aus dem LOHC wird Energie benötigt, die in den meisten bestehenden Anwendungen direkt über eine elektrische Heizung oder indirekt über eine Wärmeträgerflüssigkeit bereitgestellt wird. Im bereits am EnCN durchgeführten Projekt „Speicher B“ wurde die Abgasenthalpie eines Methan-Brenners zur Bereitstellung der Wärme für die Freisetzung des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs verwendet, um die Systemdynamik und den exergetischen Wirkungsgrad der gesamten Dehydriereinheit zu erhöhen. Die dort gewonnenen Ergebnisse und die Eigenschaften des gewählten LOHC-Systems als Energiespeicher bilden die Basis für diesen Projektantrag.

Die beiden Hauptprozessschritte der Wasserstoffspeicherung mit Hilfe der LOHC-Technologie sind die Hydrierung und die Dehydrierung der Speichermoleküle. Bei der exothermen Hydrierung wird das Speichermolekül mit Wasserstoff beladen. Um den gespeicherten Wasserstoff in einer endothermen Reaktion ganz oder teilweise freizusetzen, wird Energie in Form von Wärme sowie ein geeigneter Katalysator benötigt. Die Wasserstofffreisetzung erfordert Energie auf einem hohen Temperaturniveau, typischerweise zwischen 260 °C und 340 °C. In der Literatur existieren aktuell Ansätze, die Dehydriertemperatur deutlich abzusenken oder eine Direktverstromung des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs durchzuführen. Beide Ansätze stecken jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch im Forschungsstadium. Die beiden Prozesse Hydrierung und Dehydrierung können räumlich oder zeitlich entkoppelt in demselben Aufbau oder in unterschiedlichen Systemen ablaufen. Der freigesetzte Wasserstoff kann in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie gewandelt werden, welche durch einen Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt als Antrieb dient. Aufgrund der dynamischen Anforderungen des Antriebs sowie der unterschiedlichen Spannungsebenen im System ist ein Energiespeicher im elektrischen System nötig. Hierfür wird aktuell der Einsatz von hybriden Energiespeichern untersucht, insbesondere für BEVs (Battery Electric Vehicle). Konzeptionell sind verschiedene Systemtopologien, beispielsweise passive Kaskadierung von Batterie und Doppelschichtkondensatoren (sogenannte „Superkondensatoren“) sowie aktive parallele Einspeisung möglich. Auch die Kombination von Brennstoffzelle gespeist von Druckwasserstoff und hybriden Energiespeichern ist in der Literatur beschrieben, jedoch ebenfalls auf die Anwendung im PKW ausgerichtet. Geeignete Regelungsansätze für das Energiemanagement in hybriden Speichersystemen reichen von regelbasierten Ansätzen, über die modellprädiktive Regelung bis hin zum Einsatz von Reinforcement Learning. Hierbei

beschränken sich die Ansätze jedoch meist darauf, dass nur die Lastverteilung zwischen Batterie und Superkondensator untersucht wird. Ein weiteres Anwendungsgebiet von hybriden Energiespeichern stellt die stationäre Anwendung bei der Einspeisung von erneuerbaren Energien dar. Hierbei ist das Auslegungsziel der Anlagen stark mit der Vorausberechnung der zu erwartenden eingespeisten Energiemengen (Wind/Sonne) sowie deren Vermarktungsmöglichkeiten abhängig (netzdienlicher Betrieb). Das vorgestellte Projekt zeichnet sich durch ein hybrides Energiespeicherkonzept mit drei Speichertechnologien aus, wodurch die einzelnen Vorteile kombiniert werden. Während LOHC die höchste gravimetrische sowie volumetrische Energiedichte der eingesetzten Technologien aufweist, verfügt die Dehydrierung und Wandlung in elektrische Energie nur über eine begrenzte Dynamik. Superkondensatoren verfügen über eine hohe Leistungsdichte und stellen eine hohe Systemdynamik bei hoher Energieeffizienz sicher, wodurch die Größe des Batteriespeichers reduziert werden kann. Die Batterien werden im System eingesetzt, um die Dynamik der Brennstoffzelle vom Lastprofil des Antriebs zu entkoppeln.

Im Gegensatz zu existierenden Forschungsvorhaben werden in diesem Projekt die Schwerpunkte auf die Optimierung des Gesamtsystems im Hinblick auf die Speichergrößen und die Regelung vor dem Hintergrund der Leistungscharakteristika und Dynamik von Dehydrierer und Brennstoffzelle gesetzt. Des Weiteren wird die Effizienz und die Systemdynamik der Dehydriereinheit durch eine direkte Beheizung mit einem Wasserstoffbrenner sichergestellt, während andere Projekte häufig eine indirekte Beheizung der Freisetzungseinheit favorisieren. Entwicklungen zur Wasserstofffreisetzung aus LOHC bei niedrigeren Temperaturniveaus für die Freisetzung führen zu einer besseren Systemeffizienz, da die erforderliche Leistung des Wasserstoffbrenners reduziert werden kann. Das bisher bekannte Projekt von LOHCs in der Schifffahrt konzentriert sich auf die Seeschifffahrt mit deutlich anderen Speichieranforderungen und Lastprofilen. Der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) des Departments Chemie- und Bioingenieurwesen der FAU beschäftigt sich insbesondere mit der messtechnischen Charakterisierung sowie Optimierung und Effizienzsteigerung von technischen Verbrennungsprozessen und mit der Problematik der Wärmeübertragung bei energietechnischen Fragestellungen. Im Rahmen des Projekts „Effiziente Wasserstofflogistik“ am EnCN wurde eine LOHC - Dehydriereinheit aufgebaut, bei der die für die Wasserstofffreisetzung erforderliche Energie sehr effizient und dynamisch über einen Methanbrenner zur Verfügung gestellt wird. Weiterhin befasst sich der LTT in Drittmittelprojekten in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz Institut Erlangen Nürnberg (HI ERN) mit der Optimierung von Wasserstoff-Brennern zur indirekten Freisetzung von Wasserstoff aus LOHCs und der Thermometrie in Dehydrierreaktoren.

Das „Institut für leistungselektronische Systeme“ (ELSYS) der THN betreibt angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich leistungselektronischer Systeme, erneuerbarer Energien sowie elektrischer Antriebstechnik. Schwerpunkte der aktuellen Forschungsaktivitäten sind intelligente Ansteuerungsverfahren für elektrische Antriebe sowie die Auslegung und Regelung mehrsträngiger Maschinen. Weiterhin befasst sich ELSYS mit der Reduktion von Leistungsspitzen bei der Einspeisung von PV-Anlagen (Projekt NETPVStore) sowie dem Einsatz von Reinforcement Learning in der Antriebstechnik (Projekte KI-Power und KIRA). Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus den bisherigen Forschungsaktivitäten bilden die Grundlage für das hier beantragte Projekt. Die von den Projektpartnern am EnCN geleisteten Vorarbeiten bilden eine ausgezeichnete Grundlage für das beantragte Forschungsvorhaben, da die bisher erzielten Ergebnisse direkt weiterverwendet werden können. Im Projekt „Speicher B“ wurde die Abgasenthalpie eines Methan-Brenners zur Bereitstellung der Wärme für die Freisetzung des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs verwendet. Die im Speicherhaus am EnCN aufgebaute Dehydrieranlage (Abbildung 1) kann für das Projekt weiterverwendet werden und soll im Projektverlauf von einem Methan-Brenner auf einen Wasserstoff-Brenner umgebaut werden. Im Rahmen des EnCN Teilprojekts „Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme“ konnte ein intelligentes Regelverfahren für elektrische Antriebe entwickelt werden. Dieses wird im Projekt für die Antriebsregelung sowie die Regelung des Gesamtsystems eingesetzt. Die nötigen Systemmodelle wurden vom Institut ELSYS am EnCN erarbeitet und werden für die Dehydrieranlage und die Brennstoffzelle im Projekt gemeinsam verwendet.

Ziele und Arbeitsprogramm

Das Gesamtziel dieses Projekts ist es, einen LOHC – basierten Antriebsstrang bestehend aus drei unterschiedlichen Energiespeichern und einer im Hinblick auf die unterschiedlichen Lastprofile in der Binnenschifffahrt (Frachter, Ausflugsdampfer, Sportboot) optimierten Regelung aufzubauen. Im Rahmen des Projekts wird ein kleinskalierter Demonstrator mit einem Wasserstoff-Enthalpiestrom von 2 kW bis 6 kW und einer elektrischen Dauerleistung von 1 kW bis 3 kW realisiert. Dabei soll ein geeignetes LOHC-System als Wasserstoffspeicher dienen. Die LOHC-Dehydriereinheit bildet zusammen mit der Brennstoffzelle die erste Stufe des Antriebssystems. Die für den Antrieb erforderliche Energiemenge kann anwendungsbezogen in entsprechend dimensionierten Flüssigtanks auf dem Binnenschiff mitgeführt werden. Die maximale Leistung der Dehydriereinheit ist nicht veränderbar und ergibt sich aus der Auslegung des Dehydrierers. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die erforderliche Leistung der Dehydriereinheit stufenlos in einem begrenzten Rahmen an den erforderlichen Energiebedarf des Antriebssystems angepasst werden kann. Die erste Stufe stellt der zweiten Systemstufe elektrische Energie zur Verfügung. Die zweite Stufe wandelt die elektrische Energie in den mechanischen Antrieb des Binnenschiffs. Aufgrund der begrenzten Dynamik der ersten Stufe ist ein hybrider Energiespeicher bestehend aus Superkondensator und Batterie direkt in die zweite Stufe integriert. Die geplante Leistungselektronik kombiniert die nötigen Spannungswandlungen zwischen Brennstoffzelle, Superkondensator, Batterie und elektrischer Maschine. Abbildung 2 zeigt das geplante Antriebssystem schematisch. Der Einsatz verschiedenartiger Energiespeicher im elektrischen Teil des Systems erlaubt eine optimierte Auslegung der Komponenten sowie den Einsatz intelligenter Regelverfahren für das Gesamtsystem.

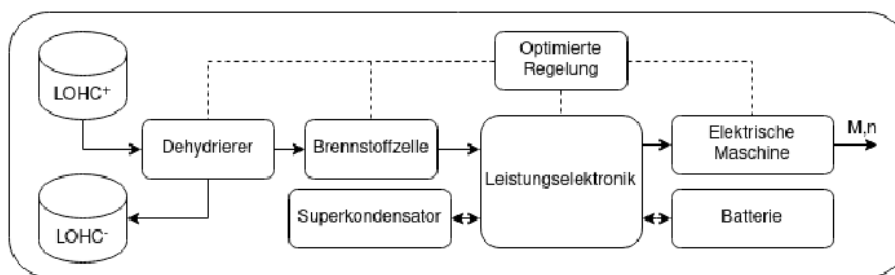


Abbildung 1: Schematische Darstellung des geplanten Antriebssystems

Die Teilziele des „Lehrstuhl für Technische Thermodynamik“ (LTT) in diesem Projekt sind:

1. Konzeption und Auslegung eines Wasserstoff-Brenners mit definierten Leistungsstufen vor dem Hintergrund einer Anwendung in einem Binnenschiff
2. Anbindung des Wasserstoff-Brenners an die bestehende Dehydriereinheit und simulative Optimierung der Brennraumgestaltung und des Abgasstroms im vorhandenen Dehydrierer
3. Charakterisierung und Optimierung der Dynamik des Systems bestehend aus Dehydriereinheit mit Wasserstoff-Brenner und Brennstoffzelle

Die Teilziele des Instituts für Leistungselektronische Systeme (ELSYS) in diesem Projekt sind:

1. Auslegung und Optimierung der Größe von Batteriespeicher, Superkondensator und Leistungselektronik
2. Untersuchung einer auf das hybride Energiesystem abgestimmten Umrichtertopologie
3. Aufbau des elektrischen Prototyps inkl. Brennstoffzelle
4. Entwicklung einer optimierten Regelstrategie für das Antriebssystem (Einsatz von Reinforcement Learning)

Basierend auf einer bestehenden LOHC-Dehydriereinheit werden Untersuchungen zur Systemdynamik und zur Skalierbarkeit durchgeführt. Des Weiteren wird die erforderliche Wärme für den Dehydrierprozess im Rahmen des Projekts über eine direkte Beheizung der Freisetzungseinheit mit einem Wasserstoffbrenner realisiert. Der entstehende Wasserstoffstrom wird nach der Dehydriereinheit gereinigt und einem Brennstoffzellensystem zugeführt. Im Rahmen des Projekts werden geeignete Kombinationen aus Dehydriereinheit, Brennstoffzelle, Batteriesystem, Superkondensator und Wechselrichtertechnologie untersucht, um mit möglichst kleiner Speichergröße auch hohe Lastspitzen bedienen zu

können. Ein weiterer Untersuchungsfokus ist die Optimierung der Energieeffizienz im Betrieb durch eine überlagerte, intelligente Regelung.

Im ersten Projektjahr werden zunächst Lastprofile von Binnenschiffen recherchiert und aufbereitet (ELSYS). Zudem wird eine Grobauslegung des elektrischen Systems sowie Simulationen auf Basis der Charakteristik der bestehenden LOHC-Dehydrieranlage durchgeführt (ELSYS). Außerdem werden an der bestehende Anlage Versuche gefahren und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Dynamik und der Lastprofile bewertet, um darauf basierend den Wasserstoff-Brenner zu konzipieren und auszulegen (LTT). Die Beschaffung einer geeigneten Brennstoffzelle bildet den Abschluss des ersten Projektjahres (ELSYS und LTT). Im zweiten Projektjahr erfolgt die Konstruktion und die Fertigung des Wasserstoff-Brenners (LTT). Dieser wird zunächst eingehend charakterisiert, bevor die bestehende LOHC-Freisetzungsanlage umgebaut und der Wasserstoff-Brenner integriert wird (LTT). Des Weiteren wird der elektrische Prototyp bestehend aus Antrieb, Antriebsumrichter, Batterie, Superkondensator und Leistungselektronik ausgelegt, gefertigt und im Labor in Betrieb genommen (ELSYS). Im dritten Projektjahr wird zunächst die Brennstoffzelle in Betrieb genommen und anschließend die Gesamtanlage bestehend aus Dehydrierer mit Wasserstoffbrenner, Brennstoffzelle und elektrischem Prototyp getestet (ELSYS und LTT). Im weiteren Verlauf erfolgt eine umfangreiche Charakterisierung der Gesamtanlage und die Auswertung der erzielten Ergebnisse (ELSYS und LTT). Im letzten Schritt des Projekts wird ein Konzept zur Skalierung der Gesamtanlage auf die Leistung eines Binnenschiffs erstellt (ELSYS und LTT).

Der interdisziplinäre Charakter des Vorhabens an der Schnittstelle zwischen anwendungsbezogener Forschung und universitärer Forschung festigt die Kooperation der beteiligten Forschungseinrichtungen und Domänen. Das Projekt soll hierbei als Brücke zwischen den einzelnen Forschungsaktivitäten an den Zukunftsthemen „Wasserstoff“ sowie „Intelligente Energiesysteme“ fungieren und diese verbinden. Durch den Aufbau eines Demonstrators für ein Gesamtsystem und der engen Kooperation der Forschungseinrichtungen wird diese Struktur nachhaltig gefestigt. Darüber hinaus eröffnen die Projektergebnisse neue Forschungsgebiete und sind Basis zukünftiger Drittmittelprojekte. Hierbei ist zum einen die Skalierung des Demonstrators in einem weiterführenden Verbundforschungsprojekt geplant. Zum anderen soll Grundlagenforschung zum Thema Wasserstoffbrenner (LTT) und die Industrialisierung der erarbeiteten Speichertopologie inkl. zentraler Leistungselektronik (ELSYS) vorangetrieben werden.

Projekt 3: Experimentelle und modellbasierte Entwicklung eines adsorptiven Plattenreaktors zur effizienten Synthese des chemischen Energiespeichers Methanol (MeOH-Reaktor)

Verbundpartner

Dr. Patrick Schühle, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT, FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr. Martin-Peter Elsner, Fakultät für Angewandte Chemie (AC, THN)

Geplante Gesamtfördersumme: 509.400 €

Projektbeschreibung

Die zunehmende Nutzung erneuerbarer, dynamisch verfügbarer Primärenergieträger wie Wind und Sonne erfordert neue Konzepte zur Speicherung und zum Transport überschüssiger elektrischer Energie. Die dynamische Synthese von Wasserstoff durch Elektrolyse unter Verwendung dieser regenerativen elektrischen Energie ist der erste Schritt zum chemischen Energiespeicher. Wasserstoff kann physikalisch allerdings nur energieintensiv bei hohem Druck (700 bar) oder kryogen (unterhalb von -240 °C) platzsparend gelagert und transportiert werden. Methanol kann als chemischer Wasserstoffträger dienen und in bestehender Infrastruktur bei Umgebungsbedingungen gelagert werden. Eine hohe Energiedichte (4,33 kWh/l), sowie die vielfältige Anwendbarkeit (Energiespeicherung, Verbrennungskraftstoff, Synthesebaustein für komplexere Kraftstoffe und Chemikalien) machen Methanol zu einem attraktiven Energieträger und

Wertstoff der Zukunft. Herausforderungen der erneuerbaren Methanol-Synthese. In einem klimaschonenden Verfahren kann Methanol aus erneuerbar gewonnenem Elektrolysewasserstoff und rezykliertem CO₂ (Abtrennung aus Luft oder industriellen Abgasen) synthetisiert werden. Die Hydrierreaktion findet klassisch in Festbettreaktoren bei 200-300 °C und 50-100 bar unter Verwendung von heterogenen Katalysatoren statt. Aus Kupfer und Indium bestehende Katalysatoren wurden von Dr. Schühle am EnCN (Speicher A, TP3) hinsichtlich Stabilität und Aktivität in der Methanol-Synthese aus CO₂ untersucht und weiterentwickelt. Wird CO₂ (statt CO, wie in der Synthese aus fossilen Rohstoffen) zu Methanol hydriert, liegt die Gleichgewichtsausbeute des Prozesses jedoch lediglich im Bereich um 25 % und die Reaktion ist demnach stark thermodynamisch limitiert. Nicht umgesetzte Edukte müssen energieintensiv rezykliert werden, was die Prozesseffizienz und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum konventionellen Syntheseverfahren deutlich senkt. Darüber hinaus zeigen Simulationen dieses Prozesses in Festbettreaktoren mit Rezyklierung der nicht umgesetzten Rohstoffe, dass insbesondere unter wechselnder Zusammensetzung des Eduktgases (wie es bei erneuerbaren Energiequellen zu erwarten ist) eine stabile Gasrezyklierung erheblich erschwert ist.

Konzepte zur Methanol-Synthese mit integrierter Produktabtrennung

Mittels integrierter Produktabtrennung können die Methanol-Ausbeuten um ein Vielfaches gesteigert und Rezyklierströme stark verringert werden. In diesem Konzept werden das Produkt Methanol und/oder das Koppelprodukt Wasser während der Reaktion aus dem katalytisch reaktiven Bereich des Reaktors entfernt, um die Gleichgewichtslimitierung zu umgehen und den Umsatzgrad zu steigern. Erste Studien zeigen bereits, dass eine solche integrierte Produktabtrennung möglich und vielversprechend ist. Neben Hochdruckprozessen (> 200 bar) mit Produktkondensation sind Membranverfahren zur integrierten Abtrennung von Methanol und Wasser zu nennen. Darüber hinaus wird derzeit in der Arbeitsgruppe von Dr. Schühle am Lehrstuhl CRT der FAU ein neues Absorptions-Konzept für die Methanol-Synthese weiterentwickelt. Dabei werden Wasser und Methanol in einer ionischen Flüssigkeit (IL) absorbiert und so aus der Reaktionsphase entfernt, wodurch die Methanol-Ausbeute nahezu verdreifacht wird. Um eine Deaktivierung des Katalysators zu verhindern, muss allerdings dessen Kontakt mit der IL vermieden werden. Weitere Nachteile sind der vergleichsweise hohe Preis der IL sowie der Austrag des gut löslichen Edukts CO₂. Einen Spezialfall der Reaktoren mit integrierter Produktabtrennung stellen die sog. Adsorptiven Reaktorkonzepte dar, bei denen die gewünschte chemische Reaktion mit einer adsorptiven Stofftrennung kombiniert wird. Katalysator und Adsorbens liegen in diesen Untersuchungen vermischt im Festbettreaktor vor. Durch den geringen Diffusionsweg zwischen beiden Komponenten wird gebildetes Wasser effizient an das Adsorbens gebunden. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Raumzeitausbeute an Methanol durch das Verfahren um mindestens 30 % gesteigert werden kann. In der Regel wird vorzugsweise nur eine Komponente in hohen Mengen aus der Reaktionsphase adsorptiv entfernt, da die Adsorption mehrerer Komponenten eine nachfolgende, in der Regel aufwändige Aufbereitung mit sich bringen würde. Ein für das adsorptive Reaktorkonzept adäquates Adsorbens muss eine hohe Selektivität gegenüber der zu entfernenden Komponente aufweisen, die Sorptionskinetik muss unter Prozessbedingungen mit der Reaktionskinetik kompatibel sein und das Adsorbens muss eine hinreichende Sorptionskapazität aufweisen.

Prof. Elsner (THN) konnte in vergangenen Forschungsvorhaben bereits geeignete Materialien für die selektive Wasseradsorption identifizieren und in ähnlichen Reaktionen erfolgreich anwenden. Aufgrund ihrer definierten Poren- und Käfigstrukturen besitzen zeolithische Adsorbentien Molsiebcharakter. Beispielsweise scheint ein 3A-Zeolith ein probates Adsorptionsmittel für die integrierte Wasserentfernung unter den Prozessbedingungen der Methanol-Synthese zu sein. Darüber hinaus muss ein geeignetes Adsorptionsmittel auch in Bezug auf die Regeneration einem bestimmten Anforderungsprofil genügen, damit der Prozess im Vergleich zu konventionellen Verfahren konkurrenzfähig bleibt. Prozesstechnisch wird ein Adsorptionskonzept realisiert, indem zwei parallel betriebene Reaktoren abwechselnd in den Reaktions- und Desorptionsmodus geschaltet werden. Die Desorption findet im Vergleich zur Adsorption bei erhöhten Temperaturen statt, weshalb ein effizienter Temperaturwechsel im Reaktor gewährleistet werden muss. Festbettreaktoren unterliegen allerdings schlechten radialen Wärmeleitfähigkeiten, was zu ungünstigen Temperaturgradienten im Festbett führen kann. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Temperaturabhängigkeit der Reaktion und der Adsorption gegenläufig verhält. Im gemischten Festbett, bestehend aus Katalysator und Adsorbens, kann das Temperaturoptimum beider Vorgänge selten eingestellt werden. Ein mit Katalysator und Adsorbens

beschichteter Plattenreaktor bietet hingegen weitreichende Vorteile für das integrierte Adsorptionskonzept (siehe Abschnitt 3). Dabei wird die Methanol-Synthese in einem Reaktor, bestehend aus mit Adsorbens und Katalysator beschichteten Platten, durchgeführt. Zentral dafür ist die Entwicklung von hochporösen, stabilen Beschichtungen, welche hohe katalytische Aktivitäten bzw. Sorptionskapazitäten für Wasser aufweisen. Im Rahmen mehrerer bestehender Projekte am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik und in der Arbeitsgruppe von Dr. Schühle konnten über Spray- und Dipcoating-Verfahren bereits stabile Aluminiumoxid-basierte Beschichtungen entwickelt werden, welche hohe katalytische Aktivität in Hydrierreaktionen zeigen. Diese Erkenntnisse dienen ebenso wie die Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten in der Methanol-Synthese (u.a. im EnCN Speicher A) als Grundlage für das in Abschnitt 3 erläuterte Vorhaben zur Entwicklung eines Plattenreaktorkonzepts mit integrierter Wasseradsorption.

Ziele und Arbeitsprogramm

Im Zentrum des dreijährigen Forschungsvorhabens steht die schrittweise Entwicklung eines Plattenreaktor-Konzepts für die Synthese von grünem Methanol mit integrierter Wasseradsorption zur Ausbeutesteigerung. Dazu soll das Konzept eines katalytisch und adsorptiv aktivierten Plattenreaktors erprobt werden. Aufbau und Betriebsweise des Plattenreaktors sind in Abbildung 2 veranschaulicht. Je eine Platte pro Reaktionsspal ist mit Katalysator und Adsorbens beschichtet. Die getrennte Beschichtung je Platte ermöglicht das separate Einstellen von optimaler Reaktions- und Adsorptionstemperatur. Die zyklische Regeneration des beladenen Adsorbens erfolgt unter Inertgasstrom unterhalb der Methanol-Synthese-Temperatur, um eine effiziente Nutzung der Reaktionswärme für die Desorption zu ermöglichen. Das Plattenreaktor-Design erlaubt ein effizientes Wärmemanagement bei schnellem Temperaturwechsel.

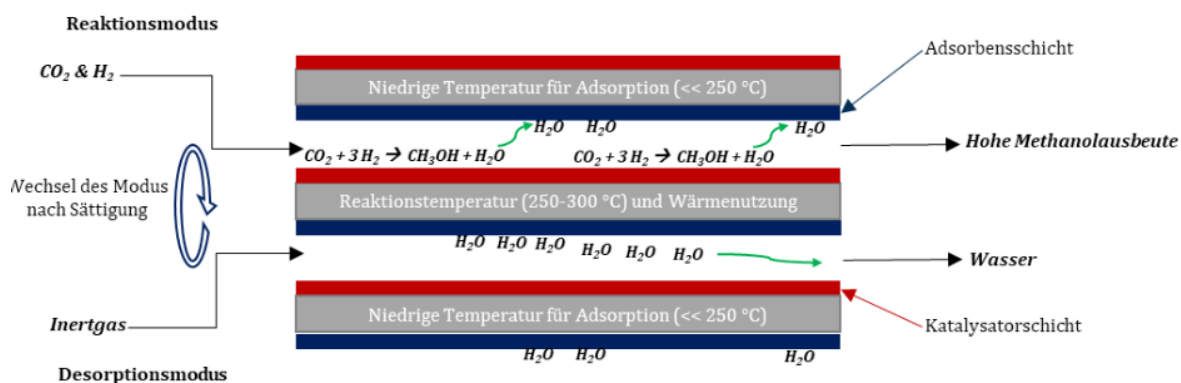


Abbildung 2: Skizze eines beschichteten Plattenreaktors zur Methanol-Synthese aus CO_2 mit integrierter Wasseradsorption zur Ausbeutesteigerung.

Forschungsaufgaben der Arbeitsgruppe Schühle (FAU) im Projekt

Ziel des ersten Projektteils ist die Entwicklung und Erprobung beschichteter Testplatten für den Reaktions- und den Adsorptionsteil des Gesamtkonzepts. Der Fokus liegt hierbei auf porösen Beschichtungen mit ausgezeichneter mechanischer, thermischer und chemischer Stabilität. Dies soll durch Belastungstests (Ultraschall, schnelle Temperaturwechsel) mit anschließender Strukturüberprüfung (z.B. durch Mikroskopie, BET) sichergestellt werden. Daraufhin wird die angestrebte hohe Aktivität der Katalysatorbeschichtung in einer bestehenden Durchflusszelle für beschichtete Platten überprüft. Reaktionstechnische Studien mit schnellen Temperaturwechseln sollen die Eignung des beschichteten Plattenreaktors für eine dynamische Methanol-Synthese untersuchen. Darüber hinaus sollen Beschichtungen für die selektive Adsorption von Wasser entwickelt werden. Dabei sind eine hohe Wasserkapazität unter Prozessbedingungen sowie die zerstörungsfreie Regenerierbarkeit entscheidend. An einem bestehenden Teststand sollen Sorptionskinetiken vielversprechender Beschichtungen bestimmt und miteinander verglichen werden. Die niedrige Adsorptionstemperatur im Plattenreaktor-Konzept ermöglicht dabei die Betrachtung bisher nicht anwendbarer Materialien (z.B. Metallhydrate und Metal organic frameworks), deren optimale Sorptionstemperatur unter der Methanol-Synthesetemperatur liegt. Der gemeinsame Einsatz der mit Katalysator und Adsorbens beschichteten Platten

in der Durchflusszelle ermöglicht anschließend die Identifikation optimaler Prozessbedingungen für die Methanol-Synthese im adsorptiven Plattenreaktor.

Forschungsaufgaben der Arbeitsgruppe Elsner (THN) im Projekt

Im zweiten Teil des Forschungsantrags soll die Untersuchung des reaktionstechnischen und ökonomischen Potentials des adsorptiven Reaktorkonzeptes durch geeignete Modellierung und anschließende Simulationsstudien für die Methanol-Synthese im Fokus stehen. Zu Beginn des Projekts soll zunächst auf Basis von Literaturdaten in vereinfachten Modellen das adsorptive Reaktorkonzept für die Methanol-Synthese im Hinblick auf die Selektivität des Adsorbens, auf die Kompatibilität der Kinetiken von Reaktion und H_2O -Adsorption sowie auf einen möglichen Einfluss auf Nebenreaktionen (z.B. die Bildung von Dimethylether) evaluiert werden. Unter Umständen müssen die kinetischen Modelle noch unter den gegebenen Prozessbedingungen experimentell validiert bzw. modifiziert werden.

Die komplexen physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen der fluiden Phase und den beiden Beschichtungen innerhalb eines Reaktionsspaltes in einem Plattenreaktor werden aufgrund der inhärenten lokalen Konzentrations- und Temperaturprofile zwangsläufig zu (zunächst pseudo-homogenen) instationären 2D-Modellen führen. Deren Entwicklung kann auf literaturbekannten Modellierungen von Plattenreaktor-Systemen für die Methanol-Synthese basieren. Eine weitere Modellverfeinerung könnte darin bestehen, dass externe und/oder interne Stofftransport-Phänomene (heterogene Modelle) mitberücksichtigt werden. Diese Modelle sollen für die quantitative Prozessgestaltung und Effizienzbewertung sowie für die Entwicklung eines geeigneten Reaktor-Designs eingesetzt werden.

Notwendigkeit der Zusammenarbeit beider Arbeitsgruppen

Das beantragte Projekt mit dem Forschungsschwerpunkt „Wasserstoff, E-Fuels und Anwendungen“ erfordert ein interdisziplinäres Vorgehen, bei dem die experimentellen Untersuchungen mit der mathematischen Modellierung und numerischen Simulation bestens aufeinander abgestimmt werden müssen. Aus diesem Grund werden alle Arbeiten beider Arbeitsgruppen (soweit von den apparativen Voraussetzungen möglich) in enger Kooperation am EnCN durchgeführt. Die Möglichkeit zur kooperativen Promotion zwischen FAU und THN gibt Raum für eine sehr enge und nachhaltige Zusammenarbeit beider Gruppen.

Strategische Einbindung des Projekts in den EnCN

Wasserstoff-Speicherung in Methanol wurde im Forschungsschwerpunkt „Speicher A“ des EnCN in der Vergangenheit bereits sehr erfolgreich bearbeitet. Das vorliegende strukturbildende Verbundprojekt soll dem Nachwuchswissenschaftler Dr. Schühle (FAU) die Möglichkeit zur Entwicklung eines eigenständigen Forschungsprofils bieten und erlaubt es, im Team mit dem Antragsteller Prof. Elsner (THN) wertvolle Arbeiten für spätere Folgeanträge, z.B. bei der DFG, zu erarbeiten. Die Erkenntnisse aus dem Einsatz der innovativen Testplatten in der Durchflusszelle sowie aus den modellbasierten theoretischen Arbeiten könnten eine hervorragende Grundlage für die spätere Demonstration des Konzepts in größerer Skala bieten. Hervorragende Anschlussfähigkeit im EnCN-Verbund wird bei der Entwicklung eines Wärmetransfer- und Regelungskonzepts für den effizienten Moduswechsel zwischen Adsorption und Desorption erwartet. Außerdem können Kompetenzen der EnCN-Partner in der Beschichtung und Strukturierung planarer Oberflächen genutzt werden.

Projekt 4: Organische Photovoltaik-Folien mit schaltbarer Transparenz für Fenster und Glasfassaden energieeffizienter Gebäude (OPVplus)

Verbundpartner

Dr. Andreas Distler (FAU-1), Inst. Materials for Electronics and Energy Technology (I-MEET, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Wolfgang Heiß (FAU-2), Inst. Materials for Electronics and Energy Technology (I-MEET)

Prof. Dr. Arno Dentel (THN-1), Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik (THN, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr. Roland Krippner (THN-2), Fakultät Architektur (THN)

Geplante Gesamtfördersumme: 726.000 €

Projektbeschreibung

Zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden sollen elektrochrome Photovoltaik-Folien für die Integration in transparente Fassadenbereiche (Fenster und sonstige Verglasungen) erforscht werden. Dazu wird eine drucktechnisch hergestellte Hybrid-Optoelektronik entwickelt, welche die Funktionalitäten „schaltbar abdunkelnd“ (elektrochrom) und „stromerzeugend“ (photovoltaisch) vereint. Der positive Effekt eines solchen Systems auf die Gebäudeeffizienz wird durch experimentelle Studien, Messungen und Simulationen untersucht.

Stand der Technik und relevante eigene Vorarbeiten

Schalt- und regelbare Sonnenschutzgläser sind in verschiedenen Systemarten (elektrochrome, gaschrome und thermotrope Gläser) bereits seit den 1990er Jahren Gegenstand der Forschung. Die Funktionalität solcher Systeme mit schaltbarem Abdunklungseffekt ist dabei insbesondere bei den elektrochromen Gläsern erprobt, oft stellt jedoch deren Farbigkeit eine Einschränkung für die Innenraumatmosfera dar, da die bisherigen Systeme nahezu ausnahmslos in Blautönen schimmern. Elektrochrome Verglasungen verändern durch das Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Tönung, um Sonnenlicht, Hitze und Blendung zu regulieren und ersetzen dadurch Außen- und Innenbeschattungsanlagen. Solche Gläser sind bereits kommerziell erhältlich und ermöglichen i.d.R. auch eine abgestufte Einstellung unterschiedlicher Schaltzustände. Dabei wird deren Transparenz über ein Kontrollsystem gesteuert, entweder manuell oder automatisch, was eine externe Stromversorgung erfordert. Die kommerziellen elektrochromen Gläser basieren meist auf Wolfram(VI)-oxid (WO_3), welches eine bläuliche Abdunklung ermöglicht. Plasmonische Nanoteilchen aus dotierten Metalloxiden zeigen elektrochromes Verhalten vor allem auch im infraroten Spektralbereich, in dem Wärmestrahlung kontrolliert werden kann. Aromatische Moleküle und Polymere decken vor allem den sichtbaren Spektralbereich ab. Sie haben den Vorteil, dass über die große Vielzahl an möglichen Materialien der zu absorbierende Wellenlängenbereich selektiv eingestellt und so praktisch jede Farbe realisiert werden kann. Allerdings führt das Anlegen eines Potentials oft nur zu einer Farbveränderung und nicht zur in diesem Projekt gewünschten Transparenzänderung. Außerdem werden die organischen Moleküle in elektrochromen Bauteilen oft als Flüssigkeit eingesetzt, während sie, wenn sie als Film eingesetzt werden, oft Stabilitätsprobleme aufweisen. Obwohl die gebäudeintegrierte Photovoltaik seit einigen Jahren nicht mehr nur auf die klassische Aufdachinstallation limitiert ist, sondern immer häufiger auch in der Gebäudefassade zum Einsatz kommt, bleibt die Integration in transparente Fassadenbereiche (Glasfassaden und Fenster) aufgrund von Limitierungen durch die verfügbaren PV-Technologien auch weiterhin sehr selten.

Die Organische Photovoltaik (OPV) bietet hierfür eine Lösung und ist aufgrund der exzitonischen Natur der pi-konjugierten Halbleitermoleküle prädestiniert für semitransparente Anwendungen. Durch entsprechende Materialentwicklung können selektiv bestimmte, für das menschliche Auge unsichtbare Bereiche des Sonnenspektrums absorbiert und in Strom umgewandelt werden, während die für das menschliche Auge sichtbaren spektralen Bereiche transmittiert werden. Im hier beantragten Vorhaben soll eine Kombination von Schaltbarkeit und Stromerzeugung in einem Hybridsystem entwickelt werden. Die Herstellung der Elemente auf Folien mittels Rolle-zu-Rolle-Druckverfahren

stellt eine weitere Innovation auf diesem Gebiet dar. Angesichts der im Bereich der Verwaltungsbauten weitverbreiteten Glasfassaden eröffnet das Forschungsprojekt damit neben Energieeinsparungen bei Heizung und Kühlung auch die Möglichkeit der Etablierung eines energieautarken Fenster-/Verglasungssystems sowie zusätzliche Energiegewinne. Um solche 'intelligenten' Verglasungssysteme im Hinblick auf das Gebäude bewerten zu können, werden Simulationswerkzeuge und Modelle benötigt, die sowohl die elektrischen, optischen und thermischen Aspekte mit einbeziehen.

Für die thermische Gebäudesimulation sowie die Simulation von Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) gibt es ausreichend Tools (z.B. Energy Plus, TRNSYS) zur energetischen Bewertung von Gebäuden und Energiesystemen. Auch für die Modellierung von Tageslicht und Solarstrahlung gibt es etablierte Softwareprogramme (z.B. Radiance und ESP-r). In einigen Fällen ist eine Kopplung möglich, z.B. mit TRNSYS. Jedoch können bestehende Fenstermodelle nur diskrete Schaltzustände (geschaltet/nicht geschaltet) der Verglasung beurteilen und keine dynamischen Schaltzustände berücksichtigen. Zum anderen bieten sie oft keine Möglichkeit Stromerzeugungs-, -wandlungs- und -speicherkomponenten zu beurteilen. Eine umfassende Bewertung des elektrochromen PV-Systems und dessen Einfluss auf die Energieeffizienz des Gebäudes erfordert jedoch eine kombinierte Betrachtung von Stromerzeugung und Strombedarf des Systems sowie dessen Einfluss auf die Parameter im Raum (wie z.B. Tageslicht, Raumtemperatur und Heiz-/Kühlenergie). Hierfür eignet sich die modular aufgebaute Simulationssprache Modelica, in der sich jegliche Art von physikalischen Modellen (z.B. thermisch, elektrisch oder optisch) abbilden und miteinander koppeln lassen sowie regelungstechnische Aspekte gut mit eingebunden werden können.



Abbildung 3: Fensterelement mit integrierten semitransparenten OPV-Modulen (FAU-1).

Auf dem Gebiet der OPV, insbesondere bei ihrer drucktechnischen Herstellung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren und der Hochskalierung von kleinen Zellen auf große Module, ist FAU-1 weltweit führend. Seit 2019 hält die Arbeitsgruppe des EnCN durchgehend den Weltrekord für die höchste OPV-Moduleffizienz (11,7 % auf 204 cm²). Im Bezug auf semitransparente OPV-Module für die Anwendung in Fenstern und Glasfassaden kann die Gruppe bereits auf Vorarbeiten vergangener Projekte zurückgreifen. FAU-2 hat sich bereits mit der Entwicklung von funktionellen Tinten zum Drucken elektrochromer Bauteile beschäftigt. Außerdem wurde ein auf Polymeren basierter, druckbarer Elektrolyt entwickelt, mit dem die beiden Elektroden der Bauteile in Batteriebauweise stabil zusammengefügt werden. Während es ausreichende Erfahrungen mit der Herstellung von Nanokristall-Tinten für elektrochrome Bauteile gibt, bleibt für dieses Projekt offen, Elektrodenmaterialien zu entwickeln, die die gewünschten komplementären Absorptionseigenschaften zu den gedruckten Solarzellen aufweisen, um daraus schaltbare, photovoltaische Hybridbauteile für energieeffiziente Gebäude zu designen. Am Technikum der THN in Rednitzhembach wurde im Außenbereich ein mobiler Fassadenversuchsstand errichtet, der es ermöglicht neuartige Ansätze von Fassadentechnologien im Maßstab 1:1 zu untersuchen. Mit diesem Demonstrator sind wesentliche bauliche Einrichtungen für experimentelle Studien in Verbindung mit einer kleinen Wetterstation und einer hohen Ausstattung an Messtechnik vorhanden.

Ziele und Arbeitsprogramm

Durch das beantragte Projekt sollen die bereits bestehenden bilateralen Kooperationen zwischen den einzelnen Arbeitsgruppen vertieft und zu einem institutsübergreifenden und interdisziplinären Gesamtkonsortium verknüpft werden. Die geplanten Arbeiten werden dabei von jedem Partner in enger Zusammenarbeit und regem Austausch mit den anderen Projektpartnern größtenteils in den Räumen des EnCN durchgeführt. Das Vorhaben soll insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs des EnCN gezielt fördern (z.B. Gruppenleiter FAU-1) und die Grundlage für zwei Promotionsvorhaben (FAU-1 & FAU-2) und mehrere Abschlussarbeiten (Bachelor & Master) bilden. Technisches Ziel des Projekts ist die Untersuchung und Verbesserung des Innenraumklimas, der Tageslichtqualität und v.a. der Energieeffizienz von Gebäuden durch die Integration von schaltbaren OPV-Folien in transparente Fassadenbereiche. Dazu wird ein optoelektronisches Bauteil entwickelt, welches einerseits schaltbar abdunkelnd ist, d.h. auf Knopfdruck weniger lichtdurchlässig wird, und andererseits unter Lichteinstrahlung stets Strom produziert, d.h. photovoltaisch aktiv ist.

Das Bauteil soll aus zwei aufeinander abgestimmten Komponenten bestehen, einem elektrochromen System und einer Solarzelle, welche sowohl mechanisch als auch elektrisch miteinander verbunden sind. Beide Komponenten sollen ausschließlich durch Druck- und Beschichtungsverfahren bei niedrigen Temperaturen zunächst auf Glas und später auf Folie hergestellt sein. Die PV versorgt das elektrochrome System mit der für das Schalten nötigen Spannung. Das elektrochrome System soll stufenlos regelbar unterschiedlich stark abdunkelnde Schaltzustände annehmen können. Das Gesamtsystem soll im Ausgangszustand eine möglichst hohe Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich (v.a. im besonders empfindlichen Bereich des menschlichen Auges zwischen 500 und 630 nm, siehe Abbildung 2) aufweisen. Im geschalteten Zustand sollen sich die Absorptionsspektren der beiden Komponenten gegenseitig so ergänzen, dass ein maximaler Verdunklungseffekt erzielt werden kann. In allen Schaltzuständen soll eine möglichst hohe Farbneutralität des Gesamtsystems erzielt werden. Demnach müssen die photovoltaischen Aktivmaterialien (möglichst wenig Absorption im photopischen Bereich) und die elektrochromen Aktivmaterialien (möglichst hohe Absorption im von der OPV transmittierten Bereich) spektral gut aufeinander abgestimmt sein.

Während die auf der Sonnenseite liegende OPV unabhängig vom Schaltzustand des Glases grundsätzlich konstant Strom liefert, soll ein potentiell effizienzsteigernder Effekt auf die OPV durch erhöhte Reflektion an der elektrochromen Schicht im abgedunkelten Schaltzustand im Projekt untersucht und quantifiziert werden. Die angestrebten Niedertemperaturprozesse ermöglichen eine kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Produktion auf Folien und dadurch auch eine nachträgliche Aufbringung auf bestehende Glasflächen. Um den Effekt solcher schaltbarer OPV-Folien auf die Energieeffizienz von Gebäuden zu ermitteln, werden großflächige Beschichtungen (FAU-1) mit repräsentativen Transmissionsspektren unterschiedlicher Schaltzustände hergestellt und in die Fensterflächen des Fassadenversuchsstands eingebaut, um daran Messungen (THN-2) durchzuführen, welche anschließend in eine Gebäudesimulation zur Modellierung der Energieeffizienz (THN-1) einfließen. Die Ergebnisse der Simulation definieren wiederum die Zielparameter für die Optimierung der beiden optoelektronischen Komponenten (FAU-1 & FAU-2), v.a. der Transmissionsspektren in den beiden Schaltzuständen.

Aufgabe von FAU-1 im beantragten Projekt ist zum einen die Entwicklung eines OPV-Moduls mit möglichst hohem Wirkungsgrad (>10 %) und dabei gleichzeitig möglichst hoher Transparenz im sichtbaren Spektralbereich (>50 %), welches sich durch Niedertemperatur-Druckverfahren auf Folien prozessieren lässt. Die hierfür zur Verfügung stehenden Aktivmaterialien werden anhand von simulationsgestützten Vorgaben und Technischen Regeln sowie Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) durch THN-1 und THN-2 hinsichtlich ihrer Eignung für die geplante Anwendung evaluiert und in Abstimmung mit FAU-2 als komplementäres Material zum elektrochromen System ausgewählt. Die für die Herstellung nötigen Beschichtungs- und Strukturierungsprozesse werden entwickelt und optimiert. Gemeinsam mit FAU-2 wird eine Lösung zur mechanischen und elektrischen Verbindung der elektrochromen und der photovoltaischen Komponente zu einer Hybrid-Optoelektronik erarbeitet. Eine auf die verwendeten Materialsysteme maßgeschneiderte Schaltung soll dabei die OPV als Spannungsquelle für eine stufenlose Regelung des elektrochromen Systems nutzen. Darüber hinaus wird FAU-1 Prozesse zur großflächigen Beschichtung von Folien mit elektrochromen und photovoltaischen Aktivmaterialien mittels Rolle-zu-Rolle-Schlitzdüsendruck entwickeln. Auf diesen Arbeiten basierend werden großflächige Musterfolien mit repräsentativen Transmissionsspektren unterschiedlicher Schaltzustände des

Gesamtsystems sowie kleinere funktionale OPV-Module hergestellt, welche beide von THN-1 und THN-2 in Versuchsaufbauten integriert und für Messungen genutzt werden. Das Ziel von FAU-2 in Bezug auf den elektrochromen Teil der Bauteile besteht darin, geeignete Elektrodenmaterialien zu finden und in Form von Tinten aufzubereiten, die bei niederen Temperaturen verarbeitet werden können. Das System soll eine stufenlose elektrische Schaltbarkeit aufweisen und dabei in einem Spektralbereich absorbieren, der komplementär zur Absorption der von FAU-1 entwickelten Solarzellen ist.

Dieser Spektralbereich ist vor allem über organische Moleküle oder Polymeren aus diesen Molekülen zugänglich. FAU-2 plant dazu die Entwicklung neuer Materialklassen, um diese zu Elektroden zu verarbeiten, welche in Halbzellenkonfiguration, in vollen elektrochromen Zellen sowie in Bauteilen mit integrierten Solarzellen von FAU-1 getestet werden. Von THN-1 wird zur Berechnung und Bewertung der schaltbaren OPV-Folien in einem effizienten Gesamtsystem (Gebäude) zunächst eine Modellierung auf Bauteilebene erstellt (OPV-Folien, Verglasung, Einrahmung, Fassadenmontage). Als Basiswerte für die OPV-Schichten dienen zunächst vorläufige Zielwerte, später Messwerte der von FAU-1 zur Verfügung gestellten Prototypen. Für die Anwendung in bestehenden Simulationsplattformen (TRNSYS, Modelica, ...) werden Softwaremodule zur Modellierung der Verglasung entwickelt (mit dynamisch veränderlichen Eigenschaften). Es folgt eine Modellierung/Simulation auf Teilsystemebene (bauphysikalisch; thermisch und tageslichttechnisch) und auf Gesamtsystemebene (Verglasung, natürliche/künstliche Beleuchtung, Heiz- und Kühlbedarf, inkl. Gebäudetechnik). Ziel ist ein Systemvergleich bzgl. Verglasungsdaten und Abdunklung für Energieeffizienz, Komfort und Wirtschaftlichkeit in vier Szenarien sowie die Systemoptimierung durch Sub-Varianten. Auf dieser Basis werden Zielwerte für die elektrochromen OPV-Folien bestimmt, welche FAU-1 und FAU- als Input für die weitere Entwicklung dienen. Parallel zur Systemoptimierung entwirft THN-1 ein kompaktes Regelungsmodul zur möglichst direkten Kopplung und Verschaltung des OPV-Moduls mit dem elektrochromen System, welches die Abdunklung in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung regelt. Zudem wird ein Konzept für einen digitalen/elektronischen Regelungskreis als Teil einer Raumregelung (Gebäudeautomation) unter Einbeziehung von Sensoren für Tageslichtstärke und Raumtemperatur entwickelt.

Daneben wird THN-2 bei Planung, Aufbau, Betrieb und Auswertung des Prüfstands und der damit verbundenen messtechnischen Validierung der Prototypen unterstützt. Durch THN-2 erfolgt für den Einbau elektrochromer PV-Folien in transparente Fassaden energieeffizienter Gebäude eine Systematisierung von baulichen Lösungsprinzipien sowie Integrationsbedingungen (Abmessungen und Proportionen) in Fassaden- und Wandkonstruktionen. Es werden die Anforderungen von Sonnenschutz, Durchsicht und Sichtverbindung nach außen, Blendschutz und Tageslichtnutzung für Arbeitsräume bewertet und in Fallstudien variiert. Unterstützt durch THN-1 wird ein Prüfstand zur optischen/energetischen Transmission aufgebaut. Zur Vorbereitung der experimentellen Studien am Fassadenversuchsstand mit den von FAU-1 zur Verfügung gestellten Musterfolien und OPV-Modulen werden Anpassungsarbeiten an Fassaden und Testräumen durchgeführt.

Projekt 5: Quartier Opt - Weiterentwicklung von technisch-ökonomischen Modellen zur Optimierung der technischen Konfiguration und Betriebsführung von Quartieren (Quartier Opt)

Verbundpartner

Dr. Jonas Egerer, Energiemarktdesign (FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr. Arno Dentel, Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik (THN, Nachwuchswissenschaftler)

Geplante Gesamtfördersumme: 529.500 €

Projektbeschreibung und eigene Vorarbeiten

Die Regulierung von Investitionsanreizen und Marktregeln für lokale Energiesysteme, hier in städtischen Quartieren, sollte zum einen eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energiequellen vor Ort ermöglichen und zum anderen eine effiziente Integration lokaler Energiesysteme ins Gesamtsystem erreichen. Der derzeitige Regulierungsrahmen ist insgesamt unzureichend entsprechende Investitionsanreize für Energiesysteme in urbanen Quartieren und deren optimalen Betrieb zu erreichen, da es neben der Förderung von Photovoltaikanlagen keinen ganzheitlichen Regulierungsansatz gibt. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wurde graduell weiterentwickelt und beinhaltet seit 2017 mit der Mieterstromzulage eine Förderung für Strom aus Photovoltaikanlagen in Mehrparteienhäusern, der in unmittelbarer Nähe zum Verbrauchsort produziert wurde. Mit der EEG Novelle 2021 ist dieses Konzept für Quartierslösungen anwendbar. Nachhaltige Quartierslösungen beinhalten neben der Stromversorgung aber auch die Bereitstellung von Wärme und Kälte. Dafür werden verschiedene Technologien genutzt, die eine lokale Transformation zwischen verschiedenen Energieträgern ermöglichen.

Für die Planung der lokalen Energiesysteme besteht neben der allgemeinen Unsicherheit über die zukünftige Preisentwicklung verschiedener Energieträger auch eine regulatorische Unsicherheit. Im aktuellen Regulierungsrahmen sind Preisanreize verzerrt, da verschiedene Energieträger unterschiedlich mit Steuern und Abgaben belastet werden und es gibt uneinheitliche Verbrauchsabgaben für lokal erzeugten Strom je nach Kombination von Erzeugungstechnologie und Nachfragetyp. Außerdem verhindern fehlende kurzfristige Knappheitspreise für Energiebezug bzw. -einspeisung in öffentliche Netze eine effiziente Nutzung der Flexibilität des lokalen Energiesystems im Gesamtsystem. Im Bereich von laufenden Forschungsarbeiten zu Quartieren werden die Eigenstromnutzung, Anlageneffizienz und im geringen Umfang Betreibermodelle untersucht. Dabei werden sowohl Neubau als auch Sanierung adressiert. In den Verbundvorhaben „+EQ-Net“, „SQ-KA-DU“, „ENaQ“, „Maggie“ und „MEMAP“ werden Quartierskonzepte umgesetzt und präsentiert, die Netzdienlichkeit, Klimaneutralität und Wirtschaftlichkeit fokussieren. Dabei werden zum einen innovative Energiesysteme mit intelligenter Betriebsweise getestet, zum anderen werden Geschäftsmodelle für Dienstleister und Mietkostenneutralität entwickelt.

In diesem Spannungsfeld haben Egerer (FAU) et al. (2021) im Rahmen eines Industrieprojekts am EnCN ein Optimierungsmodell entwickelt, das für ein städtisches Quartier in Bamberg für verschiedene Szenarien zur Regulierung und Preispfaden technische Konfigurationen und deren Betrieb untersucht. Die Forschungskompetenz und Erfahrungen zu Quartieren und 2 Gebäudezusammenschlüssen von Prof. Dentel (THN) geht unter anderen aus den Forschungsprojekten Smart City Demo, SENSIBLE und Herzo Base/Herzo Opt hervor. Im Rahmen des Projektes „Smart City Demo“ wird an einem softwarebasierenden Gebäude- und Netzdemonstrator eine dezentrale Energieversorgung auf Basis von erneuerbarer Energie und Steuerstrategien im Quartier hinsichtlich Energiebilanz und CO₂-Emissionen untersucht. Das Forschungsprojekt „SENSIBLE“ untersuchte die Integration elektro-chemischer, elektro-mechanischer und thermischer Energiespeicher in das Stromversorgungssystem sowie in Gebäude und Kommunen. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Kombination der Speicher mit lokalen Energieerzeugungseinheiten (bspw. Blockheizkraftwerk, Wärmepumpe) sowie erneuerbaren Energiequellen (Photovoltaik). In den Forschungsprojekten „Herzo Base“ und „Herzo

Opt“ erfolgte eine Systemintegration mehrerer Energieerzeuger sowie mehrerer Energiespeichertechnologien. Die Systemintegration der aktiven Komponenten ist durch eine PV-optimierte Betriebsführungsstrategie (PVC) zur Be- und Entladung der Speicher umgesetzt. Somit können die Vorteile zentraler Speichertechnologien im energetischen Gebäudeverbund gezielt genutzt werden.

Diese bisherigen und eigenen Vorarbeiten bilden eine solide Basis, für die Weiterentwicklung eines allgemeinen technisch-ökonomischen Untersuchungsrahmens für Investitionen und Betrieb von lokalen Energiesystemen in städtischen Quartieren. Allerdings fehlt die Betrachtung auf verschiedene technische Konfigurationen und Betriebsweisen unter sich wandelnden Einflüssen und Rahmenbedingungen.

Ziele und Arbeitsprogramm

Ein Eckpfeiler einer klimaneutralen Gesellschaft ist der Verzicht auf fossile Energieträger im Gebäudesektor, das heißt bei der Strom-, Wärme- und Kälteversorgung in Neubauten ebenso wie im Gebäudebestand. Die Technologien zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands sind heute bereits vorhanden (Hardware und Software), aber es fehlen die lokalen Anreize zur Implementierung im Quartier. Abbildung 4 illustriert die verschiedenen Einflussgrößen, die im Projekt adressiert werden.

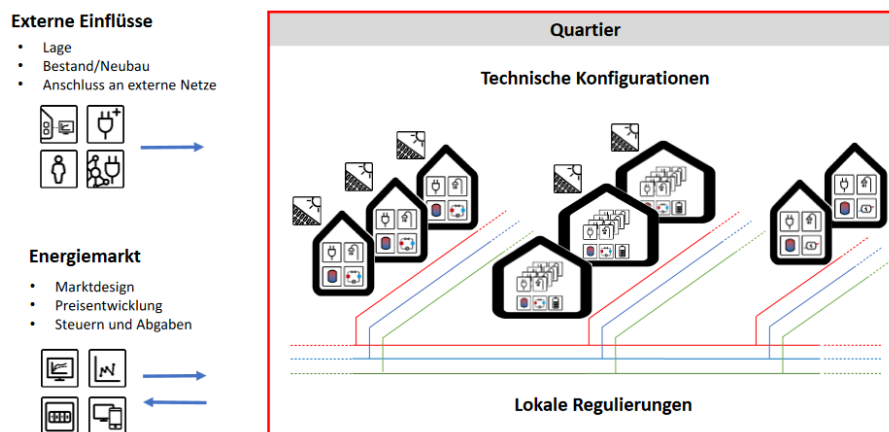


Abbildung 4: Einflussgrößen und Rahmenbedingungen für ein lokales Energiesystem im Quartier

Innerhalb des Quartiers erschwert die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung der Rahmenbedingungen die Implementierung von klimaneutralen Gebäuden und Anlagen zur Energieerzeugung und Speicherung (technische Konfiguration). Im Zusammenwirken von Quartier und Energiemarkt fehlen zum Beispiel eine Vergütung für Flexibilität und Versorgungssicherheit (Resilienz), die Kosten für direkte und indirekte CO₂-Emissionen sind zu niedrig (entspricht nicht den externen Kosten) sowie die Verteilung von Kosten (Bau/Installation) und Nutzen (Bewohner) sind ungleich verteilt. Des Weiteren verstärken externe Einflüsse die Unsicherheiten zur Konzeption des Quartiers. Um diesen Hemmnissen zu begegnen ist die Entwicklung eines allgemeinen Frameworks notwendig, auf dessen Basis verschiedene Entwicklungen und Einflussfaktoren flexibel untersucht werden können.

Ziel des Projekts ist die Verknüpfung und Weiterentwicklung bestehender Kompetenzen und Modelle zur Untersuchung von lokalen Energiesystemen im städtischen Quartier. Dafür werden in der Zusammenarbeit zwischen der FAU Erlangen-Nürnberg und der TH Nürnberg technisch-ökonomische Modelle zur Optimierung der technischen Konfiguration und des Betriebs erstellt. Diese ermöglichen eine umfangreiche Basis zur Untersuchung sich wandelnder Einflussgrößen und Rahmenbedingungen in Quartieren (Wohnen, Mischgebiete). Diese sind zum einen energiewirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen und zum anderen Unsicherheiten, wie z.B. Nutzerverhalten und Wetter. Zentrale Aspekte zur Bewertung verschiedener technischer Konfigurationen für lokale Energiesysteme im Quartier sind monetäre Kosten, Klimaneutralität, Flexibilität und Robustheit/Resilienz. Diese Ziele gehen bei einer reinen Kostenbetrachtung in die Analyse nur mit ein, falls die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen entsprechende Anreize setzen. Sie werden daher oft bei der Entscheidung über die technische Konfiguration und im Betrieb nur implizit oder überhaupt nicht

berücksichtigt, da der zusätzliche Nutzen nicht direkt auf lokaler Ebene entsteht. Aus den Ergebnissen lassen sich die Zusammenhänge zwischen verschiedenen technischen und ökonomischen Einflussgrößen und den regulatorischen Rahmenbedingungen quantifizieren. Konkret können daraus Empfehlungen für die Politik auf verschiedenen föderalen Ebenen sowie Planungshilfen und Anwendungen für Planer, Projektentwickler, Energieversorger und Contractoren abgeleitet werden. Die Arbeiten sollen in Zusammenarbeit mit Versorgern an Quartieren der Metropolregion erfolgen. Die akademischen Outputs aus dem Forschungsprojekt sind mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen in hochrangigen interdisziplinären Journalen, die Präsentation der Projektergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen und zwei technisch-ökonomische Promotionen, die im Rahmen des BayWiss Programms über die FAU Erlangen-Nürnberg erfolgen.

Wissenschaftliches Arbeitsprogramm

AP 1 – Rahmenbedingungen

In AP 1 werden verschiedene Einflussgrößen und Rahmenbedingungen auf das lokale Energiesystem im Quartier evaluiert und definiert, die aktuell und zukünftig vorliegen.

AP 2 – Entwicklung einer gemeinsamen Systematik für Modellansätze

Ziel von AP 2 ist es, eine gemeinsame Systematik zur Modellierung der technischen Konfiguration, Betriebsführung, Gebäudetypen und regulatorischen Randbedingungen zu definieren. Dies kann über eine Matrix erfolgen, die die Kopplung von Technik und Energiemarkt beschreibt.

AP 3 – Modellierung für regulatorische Rahmenbedingungen

In AP 3 werden Modelle für die Optimierung des lokalen Energiesystems in Hinblick auf den regionalen Regulierungsrahmen und nationale Energiemarktszenarien (weiter-)entwickelt. Neben der Kostenoptimierung werden dafür weitere Aspekte wie Unsicherheit, Flexibilität und Resilienz in die Betrachtung mit einbezogen.

AP 4 – Technische Konfigurationen und Modellentwicklung von Betriebsführungsstrategien

In AP 4 findet die Modellentwicklung zur Umsetzung der technischen Konfigurationen sowie zur Implementierung von Betriebsführungsstrategien statt. Die Modelle ermöglichen die Ermittlung und Ausnutzung der verfügbaren Flexibilität im Quartier durch verschiedene technische Konfigurationen und Optimierungsansätze der Betriebsführung.

AP 5 – Schnittstelle bei der Entwicklung von technischen und ökonomischen Modellen

Ziel von AP 5 ist es, einen engen Austausch zwischen beiden Forschungseinrichtungen während der Bearbeitung von AP 3 und 4 sicherzustellen. Auf monatlichen projektinternen Seminaren wird die Entwicklung der technischen und ökonomischen Modelle mit allen Beteiligten gemeinsam diskutiert. In diesem Rahmen sollen auch externe Forscher für Vorträge eingeladen werden, die sich mit der Modellierung von lokalen Energiesystemen in urbanen Quartieren beschäftigen.

AP 6 – Implementierung für verschiedene Anwendungsbeispiele

Die technisch-ökonomischen Modelle werden unter Berücksichtigung von lokalen Regulierungen und Energiemarktdesign in verschiedene Anwendungsbeispiele implementiert, um zum einen die optimale technische Konfiguration und zum anderen einen kostengünstigen Betrieb zu ermitteln. Weitere Bewertungskriterien sind Klimaneutralität, Flexibilität und Robustheit/Resilienz.

Die nachfolgend aufgeführten Arbeitspakete laufen parallel zu den Kerninhalten und unterstützen die Hauptarbeitsschritte organisatorisch. Sie beschreiben die angestrebten Struktureffekte am EnCN und die Verwertung der Ergebnisse und stellen maßgeblich den Praxisbezug und die Ergebnisqualität sicher.

AP I – Akademische Publikation und wissenschaftlicher Austausch

Zur Qualitätssicherung ist der Austausch mit der wissenschaftlichen Community auf Konferenzen wie z.B. dem Enerday, IAEE, YEEES und IEWT geplant. Außerdem sollen vier Open Access Publikationen zu methodischen und anwendungsorientierten Forschungsfragen in führenden wissenschaftlichen Journals im Bereich Energiewirtschaft bzw.

-technik im Rahmen der projektbegleitenden Promotionen veröffentlicht werden, wie z. B. Energy Economics, Energy oder Applied Energy.

AP II – Struktureffekte und Weiterentwicklung des EnCN

Die Bearbeitung des Projektes findet im engen Austausch mit Industriepartnern statt, um konkrete Fragestellungen und Hemmnisse bei der Umsetzung von Quartieren in das Projekt einfließen zu lassen und Lösungsansätze zu untersuchen. Aufgrund der Vernetzung durch die am EnCN durchgeführten Projekte sind u.a. folgende Industriepartner für die Zusammenstellung des Beirats interessant:

- GEWOBAU Erlangen Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Erlangen - Liegenschaften
- Naturstrom AG – Entwickler von Quartieren
- Energie Plus Concept GmbH – Entwickler von Energiekonzepten für Quartiere
- STWB Stadtwerke Bamberg GmbH – Versorgungsunternehmen
- N-ERGIE AG – Versorgungsunternehmen
- Stadtwerke Haßfurt – Versorgungsunternehmen und Wasserstoffanwendungen

In jährlichen Beiratstreffen mit den assoziierten Praxispartnern werden intern konkrete Problemstellungen und Praxiserfahrungen diskutiert. Zusätzlich werden in jährlichen Workshops am EnCN einem größeren Teilnehmerkreis Zwischenergebnisse präsentiert und diskutiert.

Ein wirtschaftliches Ziel zur Weiterentwicklung des EnCN besteht darin, zusammen mit den Mitgliedern des Projektbeirats ein öffentliches Forschungsprojekt zu beantragen, um die erarbeiteten Ergebnisse zu skalieren und in einer Umsetzungsphase wissenschaftlich zu begleiten.

Projekt 6: CO₂-arme Gussproduktion unter Einsatz regenerativer Energieträger in volatilen Strommärkten (RegGuss)

Verbundpartner

M.Sc. Fabian Teichmann, Lehrstuhl für Gießereitechnik (FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr. Wolfgang Schlüter, Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEFF, HSA)

Geplante Gesamtfördersumme: 601.746 €

Projektbeschreibung und eigene Vorarbeiten

Die deutsche Gießereiindustrie ist die fünftgrößte in der Welt und verursachte 2018 insgesamt 5 Mio. t CO₂-Äquivalente. Mit einem Strombedarf von 6 TWh und einem Gesamtenergiebedarf von 13 TWh gehört diese Branche somit zu den energieintensiven Betrieben in Deutschland. Gleichwohl trägt die Gießereiindustrie mit ca. 75.200 beschäftigten Mitarbeitern zu einer beträchtlichen volkswirtschaftlichen Wertschöpfung bei und sichert die technologische Kompetenz ganz unterschiedlicher Industriezweige. Eine CO₂-Reduzierung in Gießereien wird als anspruchsvoll, aber, unter Berücksichtigung des hohen Energiebedarfs dieser Industrie, auch relevant angesehen. Die Möglichkeiten für eine Reduktion der CO₂-Emissionen liegen in einer erhöhten Energieeffizienz, der Nutzung regenerativer Energiequellen sowie dem Effekt von Smart Production durch Digitalisierung. Hier muss festgestellt werden, dass die maßgeblichen Energiebedarfe in der Gießerei aus dem Schmelzen resultieren und folglich der dafür genutzte Energieträger einen hohen Einfluss auf die CO₂-Emissionen besitzt.

Das Schmelzen erfolgt bei den meisten Gießereien nach wie vor über Drehtrommelöfen bzw. Schachtschmelzöfen unter Einsatz fossiler Energieträger mit vergleichsweise geringen Wirkungsgraden (ca. 50 - 60 %) sowie hohem anlagentechnischem Aufwand für die Abgasfiltration. Die derzeitigen Maßnahmen zur CO₂-Reduktion zielen maßgeblich auf Effizienzsteigerungen im Bereich der konventionellen Ofentechnologie, bspw. durch die energetische Nutzung von Abgasströmen, ab. Dies bietet jedoch nur ein begrenztes Potential zur Reduktion der CO₂-Belastung, da nach wie vor

fossile Energieträger eingesetzt werden. Ein rein elektrisches Schmelzen ist grundsätzlich mit Vorteilen hinsichtlich des Wirkungsgrades, den reduzierten Aufwänden in der Abgasfiltration und der Anlagentechnik verbunden. Demgegenüber stehen Limitierungen in der Leistungsaufnahme sowie Fragestellungen hinsichtlich technischer Durchführbarkeit, Wirtschaftlichkeit sowie Zukunftsfähigkeit unterschiedlicher Konzepte. Bedingt durch die hohen Leistungsbedarfe und vergleichsweise geringe geographische Konzentrationen erscheint es sinnvoll, basierend auf volatilen Anforderungen des Stromnetzes, partiell regenerativ erzeugte Energieträger mit reduziertem CO₂-Footprint einzusetzen. Die Gießereien und weitere energieintensive Branchen könnten somit dazu befähigt werden, zur Netzstabilisierung beizutragen.

Eigene Vorarbeiten (KIEff, HSA)

Im Rahmen von Green Factory Bavaria und der zweiten Förderphase des EnCN wurde am Kompetenzzentrum für Industrielle Energieeffizienz (KIEff) der HS Ansbach ein Simulationsmodell für einen Aluminium-Druckgussbetrieb entwickelt. Dabei wurde die Wirksamkeit verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen untersucht und in einer frei verfügbaren App veranschaulicht. Aktuell wird im Rahmen einer Dissertation untersucht, inwieweit mit dem Simulationsmodell Betriebsoptimierungen durchgeführt werden können. Das für die Simulation notwendige Prozessverständnis wurde genutzt, um im Rahmen des EnCN ein Prozessmonitoring-System für einen Druckgießbetrieb zu entwickeln, das dann im produktiven Betrieb eingesetzt wurde. Ein weiterer Fokus der Forschung am KIEff liegt auf der Abwärmenutzung. In einem Projekt wurde dabei der LOHC-Einsatz im Rahmen der Abwärmenutzung eines gasbetriebenen Schmelzofens in einer mittelständischen Gießerei untersucht und damit unter Beteiligung der Hydrogenious GmbH und des HI-ERN exemplarisch die Wasserstoffnutzung in einem Gießereibetrieb analysiert.

Eigene Vorarbeiten (LGT, FAU)

Der Antragsteller (Prof. Müller) hat im Rahmen seiner bisherigen wissenschaftlichen Tätigkeit an der TU Braunschweig im Bereich der Energieeffizienz von Aluminium-Druckguss geforscht. Dabei hat er gemeinsam mit Partnern an der Entwicklung und Qualifizierung einer Druckguss-Sekundärlegierung sowie an der Ressourceneffizienz und Lebenszyklusanalyse gearbeitet. Im Rahmen eigener Arbeiten wurden umfangreich Konzepte zur energieeffizienten Auslegung bzw. multikriteriellen Optimierung von Temperier-Systemen erarbeitet. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Erforschung von Auslegungs- sowie Fertigungsprinzipien für Druckgieß-Leichtbauwerkzeuge im Rahmen eines laufenden DFG-Vorhabens. Hier konnte, ebenfalls simulationsbasiert, ein hoher Einfluss des Werkzeugdesigns auf die erforderlichen Energiebedarfe aufgezeigt werden. Weiterhin hat sich der Antragsteller im Rahmen seiner bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten bspw. mit der Fügetechnik von Aluminium-Druckgussbauteilen, der experimentellen Messwerterfassung und Prozessbeschreibung beim Druckgießprozess sowie mit der elektronenstrahlbasierten Randschichtmodifizierung von Gießwerkzeugen auseinandergesetzt.

Ziele und Arbeitsprogramm

In dem hier beantragten Vorhaben besteht die Möglichkeit, regenerativ erzeugte Energieträger (grüner Wasserstoff/regeneratives Methan) mittels Brennstoffzelle zur Energiebereitstellung in energieintensiven Branchen einzusetzen, um eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Entkopplung von Stromangebot und -verbrauch zu erreichen, was durch die Volatilität regenerativer Energieträger immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die Demonstration erfolgt im Rahmen des Projektes konkret am Beispiel Gießerei mit dem Fokus auf den energieintensiven Anteil Schmelzen. In Gießereien besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Abwärme im Brennstoffzellen-Einsatz für den Prozess zu nutzen - mit dem Ziel einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrades im Brennstoffzellen-Einsatz. Das Ziel des Projektes besteht darin, die innerhalb der Systemgrenze 1 (Abbildung 5) liegenden Instanzen experimentell zu realisieren und zu modellieren sowie auch Stoff- und Energieströme innerhalb erweiterter Systemgrenzen (z.B. Systemgrenzen 2 und 3) hinsichtlich der Stoff- und Energieströme zu modellieren. Im Ergebnis sind vorteilhafte Szenarien zu identifizieren, wie der Einsatz regenerativer Energieträger in industriellen Produktionsumfeldern mit hohen Energiebedarfen erfolgreich realisiert werden kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden drei Alternativen untersucht und in ihrer Effektivität gegenübergestellt:

1. Mit einem Elektrolyseur wird in Zeiten „billigen“ Stroms aus dem Stromnetz Wasserstoff produziert und gespeichert. Dabei stellt eine besondere Herausforderung die Auswahl der Speichertechnologie dar, wobei insbesondere die Alternativen Verdichtung und dem in der Entwicklung befindlichen LOHC-One-Reaktor untersucht werden sollen. In

Zeiten von „teuerem“ Strom („Dunkelflaute“) wird der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle verstromt und reduziert den Strombedarf der Gießerei aus dem öffentlichen Netz.

2. Mit regenerativen Energiequellen erzeugter grüner Wasserstoff wird angeliefert und bei Bedarf verstromt. Dabei sind die verschiedenen Möglichkeiten der Anlieferung zu betrachten. Eine Option bietet dabei die LOHC-Anlieferung mit Nutzung einer Release-Unit.

3. Statt Wasserstoff kommen für die Verstromung in einer gasbetriebenen Brennstoffzelle auch E-Fuels oder sogar Erdgas in Frage. Die Untersuchung dieser Alternative gibt insbesondere Aufschluss darüber, inwieweit der Einsatz von Wasserstoff in den Alternativen 1. und 2. auch ökonomisch sinnvoll ist. Mit dem beantragten Forschungsvorhaben werden konkrete Fragestellungen hinsichtlich technischer Durchführbarkeit, Wirtschaftlichkeit sowie Zukunftsfähigkeit unterschiedlicher Konzepte beantwortet. Mit der Erarbeitung eines Demonstrators und Datengrundlagen für unterschiedliche Szenarien besteht ferner das Ziel, diese Ergebnisse den Gießereien, Kunden, beteiligten Akteuren in der Energiewende sowie der Gesellschaft zu kommunizieren, um somit konkrete Handlungsoptionen, aber auch Herausforderungen aufzuzeigen.

Das Projekt ist den beiden EnCN-Schwerpunkten „Wasserstoff, E-Fuels und Anwendungen“ und „Intelligente Energiesysteme“ zuzuordnen. Forciert durch die deutsche Energiewende kann mit einer Demonstrationsanlage und einer simulationsbasierten App der EnCN zu einem weltweit sichtbaren Forschungs-Nukleus für die Transformation der Gießereiindustrie hin zu einer CO₂-armen Produktion werden.

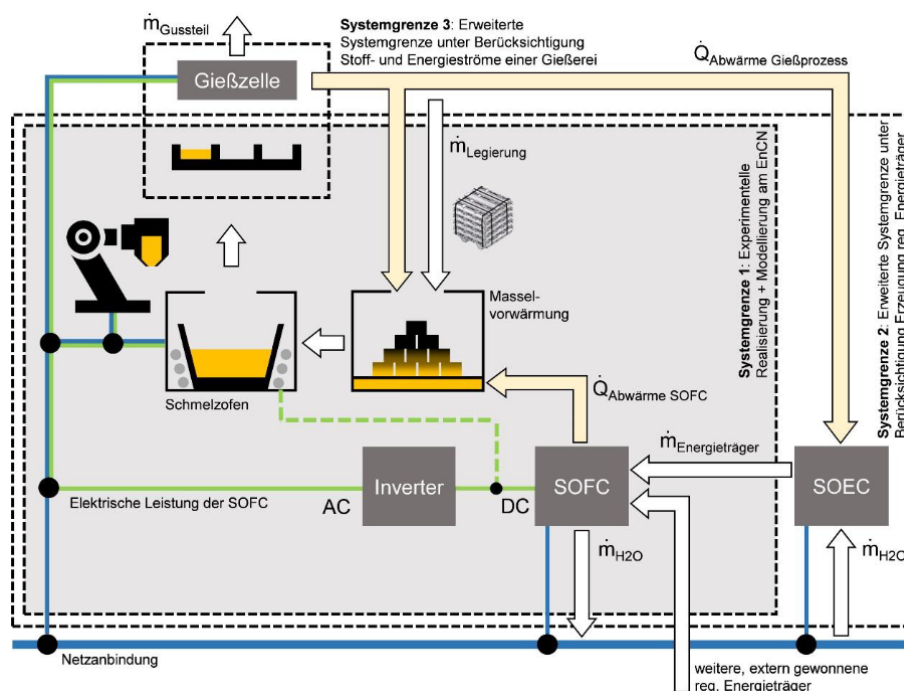


Abbildung 5: Energie- und Materialversorgung bei einem rein elektrischen Gießprozess unter Einsatz einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle (solid oxide fuel cell, SOFC)

Für den EnCN ergeben sich aus dem Projekt die folgenden Struktureffekte:

- Die Kompetenzen in apparativer und prozesstechnischer Gießereitechnik und gießereispezifischer Simulation und Digitalisierung werden gebündelt.
- Industrieunternehmen sollen als Praxispartner beteiligt werden, um diese bei den Herausforderungen der Energiewende zu unterstützen. Dadurch wird die Vernetzung in der Metropolregion gestärkt.
- Mit dem Thema Wasserstoff wird eine Brücke zu weiteren zukünftigen Forschungspartnern wie dem CRT-Lehrstuhl der FAU und dem Wasserstoffzentrum H2.B geschlagen.
- Mit dem Aufbau eines Demonstrators am EnCN und der späteren Implementierung in die Modellgießerei am Lehrstuhl für Gießereitechnik der FAU wird eine Möglichkeit geboten, Gießereien und weitere involvierte

Industriezweige direkt über die technologische Realisierung und Leistungsfähigkeit der Technologie zu informieren.

- Das Verbundprojekt kann somit als Nukleus für Folgeprojekte dienen, indem es die spezifizierten Anforderungen für eine dezidierte Entwicklung von Anlagenkomponenten nutzt und durch eine Versuchsanlage in einer Gießerei den möglichen Industrieinsatz demonstriert.
- Über die Einbindung des „Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie“ (BDG) und die Mitwirkung der beteiligten Lehrstühle in den entsprechenden Gremien des BDG besteht die Möglichkeit einer direkten Information der involvierten Partner; die Einbindung des BDG am EnCN wird somit ebenfalls verstetigt. Das Vorhaben wird seitens des BDG explizit unterstützt.
- Durch die Vernetzung zum Institut „Neue Materialien Fürth“ (NMF) ist ein direkter Industrietransfer möglich, weiterhin können über die Netzwerke des NMF gezielt weitere Partner, z.B. aus dem Bereich Thixomolding angesprochen werden.

Wissenschaftliche Zielsetzung (KIEff, HSA)

Die dynamische, hybride, bidirektionale und frei konfigurierbare Material- und Energiefluss-Simulation bildet die Basis für ein generisches Modell zur Stoff- und Energieflussoptimierung, mit dem das Projektziel erreicht werden kann, nämlich die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten (ökonomisch, ökologisch, technisch) von regenerativen Energieträgern und insbesondere H₂ als Energiespeicher in Gießereien. Mit der Übertragung des bereits existierenden Simulationsmodells auf rein elektrisch betriebene Gießereien mit Fokus auf die volatile Stromversorgung mit regenerativen Energieträgern lassen sich in einem energiepolitisch dynamischen Umfeld simulationsbasiert Empfehlungen für den Umbau von Bestandsgießereien für einen zukunftssicheren Betrieb aussprechen. Das KIEff wird damit in seiner spezifischen Kompetenz gestärkt und kann seine Funktion als wissenschaftliche Begleitung des erforderlichen Wandels der Gießereibranche innerhalb des „Bundes Deutscher Gießereiunternehmen“ (bdguss) entscheidend ausbauen.

Wissenschaftliche Zielsetzung (LGT, FAU)

Mit der Etablierung eines Realdemonstrators wird der LGT dazu befähigt, eine neue Prozesskette zu untersuchen, die maßgeblich auf dem Prinzip des dezentralen Schmelzens basiert. Dies führt zu neuen Herausforderungen, z.B. im Bereich der lokalen Schmelzereinigung, der prozessbegleitenden Überwachung der Werkstoffkomposition, der Werkstoffdosierung und -logistik, aber auch Möglichkeiten einer höheren Flexibilität bzw. Resilienz bei Anlagenausfall, einer möglichen höheren Legierungsvielfalt sowie geringeren Aufwänden in der Abgasfiltration. Der Realdemonstrator liefert unter anderem für die genannten Punkte quantifizierbare Werte für ein Demonstrator-Bauteil (Zielsetzung 1). Die Modelle der Stoff- und Energiestromsimulation des KIEff werden somit um konkrete Handlungsfelder in dem Bereich Gießereitechnik ergänzt. Ein weiterer Schwerpunkt im Hinblick auf die wissenschaftliche Zielsetzung liegt in der Mitwirkung beim generischen Modell zur Stoff- und Energieflussanalyse. Die weitere wissenschaftliche Zielsetzung liegt hier darin, das „Makro“-Modell des KIEff seitens des LGT um ein Modell zu ergänzen, welches die Energieströme in der Gießmaschine ab der Schmelzedosierung berücksichtigt (Zielsetzung 2).

Arbeitsprogramm inkl. vorgesehener Untersuchungsmethoden

Das Arbeitsprogramm beinhaltet den in Abbildung 5 gezeigten Modellraum. Basis ist die experimentelle Realisierung innerhalb der Systemgrenze 1 (LGT) sowie eine Modellierung von Stoff- und Energieströmen, die innerhalb der Systemgrenzen 2 und 3 liegen (KIEff, LGT). Entsprechend der Kompetenzen ist der LGT für die Realisierung der Demonstrationsanlage und das KIEff für den Aufbau der Stoff- und Energiestromsimulation zuständig. Da der Strombedarf von Gießereien sehr stark vom Anlagenzustand und der Anlagenauslastung abhängt, ist der Einsatz regenerativer Energieträger simulationsbasiert zu untersuchen. Dazu ist ein umfassendes, frei konfigurierbares Simulationsmodell einer Gießerei notwendig, das den Materialfluss und bidirektional gekoppelt den dynamischen Energieverbrauch abbildet.

Projekt 7: Herstellung und Charakterisierung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren zur Anwendung in Sorptionsspeichern (Zeolith)

Verbundpartner:

Dr. Marcus Fischer, Erlangen Center for Interface Research and Catalysis (ECRC, FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Prof. Dr. Barbara Hintz, Fakultät Werkstofftechnik (THN, Nachwuchswissenschaftlerin, Nachfolge Prof. Dr. W. Krcmar)

Geplante Gesamtfördersumme: 465.850 €

Projektbeschreibung und eigene Vorarbeiten

Das Ziel des Verbundprojektes besteht darin, aus Geopolymeren durch Hydrothermal- und Steam-Assisted-Synthese Zeolith-Granulate und -Hohlprofilkörper für die Anwendung als thermisches Sorptionsspeicher-Material herzustellen. Für die Herstellung werden Reststoffe wie Ziegelmehl, Ziegelschleifstaub, Betonbauschutt, Mischbauschutt und Flugasche eingesetzt. Die Formgebung der Geopolymer-Hohlprofilkörper erfolgt mittels Gießen, Extrusion und 3D-Druck. Die Machbarkeit, einfache Geopolymer-Formkörper in stabile Zeolith-Formkörper umzuwandeln, wurde bereits durch ein einjähriges Vorprojekt an der THN belegt. Aufbauend auf den Ergebnissen ist im hier beantragten Vorhaben eine Studie der Reaktionsparameter bei der Hydrothermal-Synthese geplant, bei der qualitative und quantitative Korrelationen zwischen den Verfahrensparametern Temperatur, Druck, pH-Wert, Reaktionszeit sowie relevanter Eigenschaften der Ausgangsmaterialien (Si/Al-Verhältnis, Anteil kristalliner und amorpher Phasen, Puzzolanität) auf resultierende Zeolith-Typen und deren Ausbeute erarbeitet werden. Außerdem soll eine Steam-Assisted Synthese entwickelt werden, um das Verfahren in einen technisch nutzbaren Maßstab zu überführen. Die Anwendungseigenschaften der synthetisierten Zeolithe werden auch mit einem vorhandenen thermischen Sorptionsspeicher ermittelt, um die Güte der Proben zu bewerten und die Ergebnisse der Simulationen verifizieren zu können. Typische kommerzielle Speichermaterialien sollen als Referenz im Sorptionsspeicher in gleicher Weise untersucht werden. Durch den Einsatz von Reststoffen und eine vollständig bindemittelfreie Synthese-Route können Zeolith-Hohlprofilkörper im besten Fall sowohl nachhaltiger als auch kostengünstiger hergestellt werden.

Stand der Technik

Beim Einsatz in Sorptionswärmespeichern bieten Zeolithe eine hohe Speicherdichte bei verlustarmer Langzeit-Speicherung und Entkoppelung von Ladeleistung und Speicherkapazität, bei gleichzeitiger Einsatzmöglichkeit über einen breiten Temperaturbereich. Ein großer Nachteil bei der Anwendung von Schüttungen des Speichermaterials ist die geringe Wärmeleitfähigkeit sowie ein deutlicher Druckverlust des durchströmenden Fluids. Für technische Umsetzungen werden deswegen monolithische Hohlkörper angestrebt, die beim Durchströmen einen geringeren Druckverlust bei höherer Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dazu werden verschiedene Ansätze verfolgt wie z.B. zeolithbeschichtete Monolithe aus Schulp oder Cordierit, bindemittelbasierte Zeolith-Körper und bindemittelfreie Zeolith-Körper. Um die Monolithe mit einer Zeolith-Schicht auszurüsten, eignet sich z.B. das In-situ-dipcoating. Zur Herstellung bindemittelbasierter Zeolith-Körper werden Zeolith-Granulate mit Bindemitteln gemischt, durch Formgebungsprozesse wie z.B. Extrusion in die erwünschte Geometrie gebracht und je nach Verfahren thermisch nachbehandelt. Bindemittelfreie Zeolith-Körper werden durch Formgebungsverfahren wie Gießen oder Extrudieren unter Einsatz temporärer Bindemittel wie z.B. Kaolinit modelliert. Das Bindemittel wird im Anschluss thermisch zu Metakaolin und dann nasschemisch zu Zeolith umgewandelt. Die zeolithbeschichteten Monolithe haben den Nachteil eines geringen Zeolith-Anteils. Auch darf der Monolith als Zeolith-Träger keinen Einfluss auf die angestrebte chemische Reaktion haben und muss den Reaktionsbedingungen standhalten. Die größte Einschränkung bei bindemittelbasierten Zeolith-Körpern ist die unzureichende thermische Stabilität, besonders beim Einsatz von Polymeren als Bindephase. Um homogene Proben zu erhalten, muss bei den bindemittelfreien und bindemittelbasierten Herstellungsverfahren der Zeolith-Bindemittel-Schlicker durch Additiv-Zugaben so eingestellt werden, dass bei Gießprozessen eine Sedimentation vermieden wird und

bei Extrusionsprozessen die Eigenschaften wie Plastizität und Viskosität für den Formgebungsprozess geeignet sind. Die Umwandlung von Geopolymeren zu Zeolithen mittels Hydrothermal-Synthese ist zwar aus der Vorstudie der THN bekannt, jedoch ist der zugrunde liegende Mechanismus bislang nicht aufgeklärt.

Innovationen und Herausforderungen

Bei der hier vorgeschlagenen Synthese-Route muss auf keine zusätzlichen Bindemittel, sowohl dauerhafte als auch temporäre, zur Gestaltung der Formkörper-Geometrie zurückgegriffen werden. Dies hat im Vergleich zu den bindemittelbasierten Formkörpern eine erhebliche Erweiterung der möglichen Betriebstemperaturen zur Folge, so dass sich z.B. in der Anwendung im Sorptionsspeicher neben der latenten Verdampfungsenthalpie zusätzlich ein größerer, von der Temperaturdifferenz abhängiger, sensibler Wärmeanteil ein- und ausspeichern lässt. Im Vergleich zu bindemittelfreien Formkörpern, die mit einem temporären Bindemittel zur Formgebung versehen werden, bietet das hier betrachtete Vorgehen den Vorteil, dass keine Anpassung der rheologischen Eigenschaften des Schlickers durchgeführt werden muss, um z.B. beim Gießen ein Sedimentieren des Zeolith-Granulats zu verhindern oder die erforderliche Plastizität für ein Extrusionsverfahren einzustellen. Im Vergleich zu den bindemittelbasierten und bindemittelfreien Zeolith-Körpern, wird kein natürliches oder synthetisch hergestelltes Zeolith-Granulat als Ausgangsmaterial benötigt. Stattdessen werden fast ausschließlich Bau-Reststoffe als Ausgangsmaterial für die Geopolymere eingesetzt. Der Zeolith entsteht direkt nach der Formgebung durch Hydrothermal-Synthese aus einem Geopolymer bei moderaten Temperaturen im Bereich von 75 bis 120 °C, was zu einer deutlichen Kostenersparnis führen wird, da die etablierten Zeolith-Synthesen verfahrenstechnisch aufwendiger sind (z.B. Sol-Gel-Verfahren). Außerdem soll eine Steam-Assisted-Synthese der Zeolithe aus Geopolymer-Zwischenstufen entwickelt werden. Dadurch können durch ein technisch einfaches und leicht skalierbares Verfahren die 3D-gedruckten Geopolymer-Formkörper in Zeolithe umgewandelt werden. Hierbei können durch vorhandene In-situ-Charakterisierungsmethoden wie Röntgendiffraktometrie (XRD) Aufschlüsse über den Umkristallisationsmechanismus erhalten werden, welche wiederum zur Optimierung der Synthese nützlich sind. Im Allgemeinen ist es möglich, mit Hilfe der am ECRC etablierten Charakterisierungsmethoden wie Stickstoffsorption, Quecksilber-Porosimetrie, XRD, REM, EDX, MAS-NMR- und IR-Spektroskopie die synthetisierten Zeolithe optimal hinsichtlich ihrer Porosität, Morphologie, Oberflächeneigenschaften und elementaren Zusammensetzung zu beschreiben. Die Performance der Materialien als thermochemische Wärmespeicher wird über DVS- und STA-Messungen bestimmt, wobei vor allem wichtige Eigenschaften wie die max. Wasseraufnahmekapazität, Adsorptionsenthalpie und Zyklenstabilität untersucht werden. Die Expertise für die Modifikationen von templatfreien und templatbasierten Zeolith-Synthesen erweitert perspektivisch die Synthesestrategie zur gezielten Herstellung spezifischer Zeolith-Typen. Generell stellen die komplementären Erfahrungen bezüglich Synthese und Charakterisierung von Geopolymeren und Zeolithen von THN und FAU (ECRC) eine sehr gute Grundlage für diese Arbeit dar.

Das hier vorgestellte Verfahren zur Herstellung monolithischer Zeolith-Hohlprofile birgt auch gewisse Risiken. Bei nicht vollständiger Umsetzung des Geopolymers, kann deren Eigenschaft, Schwermetalle zu binden, evtl. zu unerwünschten Nebenreaktionen führen. Eine Elementanalyse mittels einer vorhandenen ICP-OES kann zur Aufklärung dieser Fragestellung genutzt werden. Die hier vorgeschlagene kostengünstige und nachhaltige Herstellung von Zeolith-Hohlkörpern kann beim Einsatz in Sorptionsspeichern dazu dienen, die Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und -nachfrage besonders bei erneuerbaren Energien wärmetechnisch zu puffern und auf diese Weise einen wertvollen Beitrag zur Energiewende leisten. Darüber hinaus ist auch ein Einsatz in der technischen Adsorption und Katalyse möglich, was das Feld für mögliche Folgeanträge und Drittmittelprojekte deutlich erweitert.

Ziele und Arbeitsprogramm

AP 1: Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren

Die THN wird die Zeolith-Synthese aus Geopolymeren durchführen. Dabei werden die Proben im Rahmen einer Parameterstudie hergestellt, bei der material- und reaktionsseitige Parameter variiert werden (Materialseitig: Si/Al-Verhältnis, amorpher/kristalliner Anteil, Puzzolanität; Reaktionsseitig: Druck, Temperatur, pH-Wert, Reaktionsdauer). Die FAU führt an den hergestellten Proben eine umfassende Charakterisierung hinsichtlich ihrer materialspezifischen

Eigenschaften wie Porosität, Morphologie, Oberflächeneigenschaften und elementare Zusammensetzung durch. Die Eignung der Materialien als Sorptionsspeicher wird mit Hilfe von DVS- und STA-Messungen getestet und bewertet. Außerdem wird die Anwendbarkeit der Steam-Assisted-Synthese von Zeolithen auf Geopolymere als Ausgangsmaterialien untersucht. Um ein tieferes Verständnis des chemischen Umwandlungsprozesses und dessen Mechanismus zu erhalten, werden In-situ-XRD-Messungen bei Synthesetemperatur in kontrollierter Atmosphäre durchgeführt.

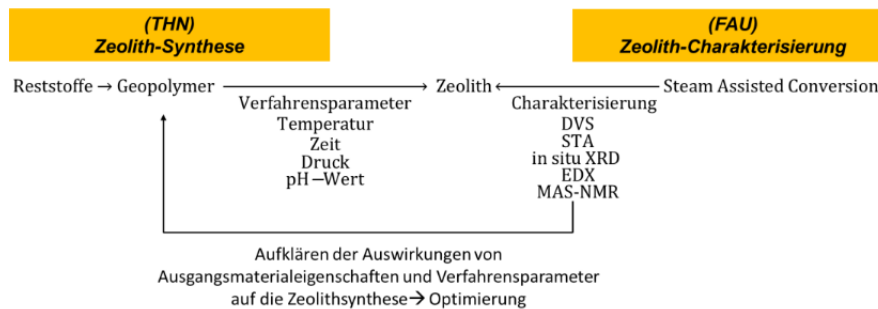


Abbildung 6: Schematische Darstellung der ineinandergreifenden Teilaufgaben für Arbeitspaket 1

Gemeinsames übergeordnetes Ziel

Die Ergebnisse der Charakterisierung durch die FAU dienen dazu, gemeinsam mit der THN die relevanten Material- und Verfahrensparameter aufzuklären, um Zeolithe aus Geopolymeren zu synthetisieren und gegebenenfalls gezielt für die Anwendung zu modifizieren.

AP 2: Formgebung

Das Ziel der THN besteht darin, geeignete Parameter-Kombinationen zu entwickeln, aus denen durch die Verfahren 3D-Druck, Gießformgebung und Extrusion zunächst einfache Hohlkörper-Geometrien hergestellt werden. Diese Formkörper werden im Anschluss durch Hydrothermal-Synthese zu Zeolithen umgewandelt. Ziel ist die Herstellung formstabiler Zeolith-Hohlkörper.

Das Ziel der FAU besteht darin, die in AP 1 synthetisierten Formkörper zu charakterisieren, um die Übertragbarkeit der Parameter auf die Umwandlung einfacher Formkörper zu überprüfen. Zusätzlich wird auf Grundlage der Erkenntnisse aus AP 1 die Steam-Assisted-Synthese für die Anforderungen an die Formkörper (z.B. Formerhaltung) weiterentwickelt, um die Überführung in ein Verfahren in technisch relevanter Größenordnung zu verwirklichen.

AP 3: FEM-Simulation, Anwendungseigenschaften und geometrische Optimierung

Das Ziel der THN besteht in der Entwicklung eines Simulationsmodells, das die Adsorptions- und Desorptionsprozesse sowie die sensibel eingespeicherten Anteile der Wärme beim Einsatz der Zeolithe in einem Sorptionsspeicher abbildet. Anhand des Modells wird mittels Sensitivitätsstudien eine geometrische Optimierung der monolithischen Hohlkörper durchgeführt, um den Druckverlust sowie die Be- und Entladezeiten zu minimieren, bei gleichzeitiger Maximierung von Nutzungsgrad und Speicherkapazität. Die so optimierten Hohlkörper-Geometrien, werden durch geeignete Formgebungsverfahren hergestellt.

Das Ziel der FAU im AP 3 besteht darin, die geometrisch optimierten Geopolymer-Hohlkörper durch geeignete Steam-Assisted-Synthesen zu Zeolith-Formkörpern umzuwandeln. Diese Zeolith-Formkörper werden im weiteren Verlauf als thermochemische Sorptionsspeicher bezüglich wichtiger Anwendungseigenschaften wie Druckverlust, Nutzungsgrad, Speicherdichte, Be- und Entladezeit und Wärmeverteilung untersucht und so die Ergebnisse der Simulationsmodelle experimentell validiert.

Strukturbildende Effekte für den EnCN

Die beteiligten Projektpartner sind aufgrund ihrer jeweiligen Expertise und der vorhandenen laborspezifischen Ausrüstung in der Lage, das Vorhaben gemeinsam durchzuführen. Der größte Teil der Arbeitsaufgaben kann in den Laboren des EnCN erfolgen. Durch das gemeinsame Forschungsvorhaben besteht für die beteiligten Nachwuchsforscher aus den verschiedenen Hochschulen die Möglichkeit zu einer langfristigen wissenschaftlichen Zusammenarbeit im EnCN. Die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnisse werden im Anschluss als Basis zur Beantragung und Durchführung weiterer Verbundprojekte genutzt. Außerdem können die Ergebnisse auf weitere technische Anwendungen wie die Katalyse, Molekularsiebe und Ionentauscher übertragen werden. Der hier geplante interdisziplinäre Forschungsansatz führt zu einem erheblichen Wissenszuwachs bei den beteiligten Partnern und ermöglicht in Zusammenarbeit mit der Industrie eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit in der Metropolregion Nürnberg.

Projekt 8: Modellbasierte Optimierung von Zwangsdurchlaufverdampfern in der Kältetechnik (STEAM)

Verbundpartner

Prof. Dr.-Ing. Frank Opferkuch, Forschungsgruppe Dezentrale Energiewandlung und Speicherung (ENE, THN)

Dr. Patric Müller, Lehrstuhl für Multiscale Simulation of Particulate Systems (MSS, FAU, Nachwuchswissenschaftler)

Geplante Gesamtfördersumme: 490.440 €

Projektbeschreibung und eigene Vorarbeiten

Der Betrieb von Kältesystemen verursacht in Deutschland etwa 5,6 % des Primärenergieverbrauchs. Der Energiebedarf steigt insbesondere durch den starken Zuwachs von Wärmepumpen zur Gebäudebeheizung. Durch die Optimierung der Schlüsselkomponenten solcher Systeme können diese Anlagen künftig energieeffizienter, sicherer und damit kostengünstiger betrieben werden. Konkret wird hierzu im Projekt, basierend auf Simulationsmodellen, die Geometrie von Wärmeübertragern für den Einsatz in Zwangsdurchlaufverdampfern in der Kältetechnik optimiert. Der relevante Stand der Technik bezieht sich auf die folgenden Punkte:

- **Zwangsdurchlaufverdampfer in der Kältetechnik**

Kompressionskältemaschinen arbeiten in der Regel nach dem Kaltdampfprinzip. Dabei wird ein Kältemittel in einem Kompressor verdichtet, in einem Verflüssiger abgekühlt (und verflüssigt), in einem Expansionsventil entspannt und im Verdampfer wieder aufgeheizt (verdampft). Das kostenintensivste Bauteil ist dabei der Kompressor. Hersteller und Betreiber der Anlagen legen großen Wert auf die Durabilität des Kompressors, um die Zuverlässigkeit der Anlage zu gewährleisten und laufende Kosten für Reparaturen zu minimieren. Ein potentiell Risiko für den frühzeitigen Kompressordefekt birgt die unzureichende Verdampfung des Kältemittels, durch die Kältemitteltröpfchen in den Kompressionsraum gelangen, den Schmierfilm abwaschen oder sogar die Ventilplatte durch Flüssigkeitsschläge zerstören. Da die Siedevorgänge im Verdampfer - und damit die Prädiktion von Tröpfchen – aufgrund der Komplexität des Wärme- und Stofftransportes schwer zu prognostizieren sind, wird heute der pragmatische Ansatz des Überhitzens angewandt. Dabei wird das Kältemittel über die Taulinie hinaus erhitzt, um sicherzustellen, dass keine Tröpfchen in den Kompressor gelangen. Dieser Lösungsansatz hat allerdings zur Folge, dass der Verdampfer sowohl größer (das Bauteil muss um ca. 20 % überdimensioniert werden) und damit schwerer und kostenintensiver dimensioniert werden muss, als auch an Effektivität verliert, da die für die Überhitzung vorzuhaltenden Bereiche des Verdampfers nur geringe volumetrische Leistungen haben.

- **Simulation von Mehrphasensystemen in komplexen Randbedingungen**

Bei den Vorgängen im Wärmeübertrager handelt es sich um ein Problem, bei dem die Interaktion von Festkörper, Flüssigkeit und Gas unter Berücksichtigung der entsprechenden Phasenübergänge und des Wärmetransports betrachtet

werden muss. Zudem liegen geometrisch komplizierte, teilweise freie und zeitlich veränderliche Randbedingungen vor. In den letzten Jahren haben sich für derartige Probleme partikelbasierte Simulationsmethoden etabliert und als in vielen Fällen vorteilhaft gegenüber den gängigen gitterbasierten Verfahren erwiesen. Unter den partikelbasierten Simulationsmethoden eignet sich für die beim Verdampfer relevanten Längen- und Zeitskalen insbesondere die Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH). Mit SPH wurden bereits Benetzungs-, Verdampfungs- und Kondensationsphänomene sowie die Wärmeübertragung in der festen, flüssigen und gasförmigen Phase simuliert.

Vorarbeiten ENE

Die Forschungsgruppe ENE bearbeitet Forschungsfragen aus den Bereichen Abwärmeverstromung, elektrochemische Energiewandlung (Brennstoffzellen) und Speicherung (Batterie-Systeme), energieeffiziente Kälteaggregate und Verfahren für das Energiemanagement von dezentralen Energiesystemen mit erneuerbaren Energien und Energiespeichern. Hervorzuheben sind die Projekte „NekoEis“ und das Verbundvorhaben „ND-Sens“, bei dem es gelang, unvollständige Siedevorgänge des Kältemittels am Austritt des Verdampfers spektroskopisch zu detektieren (Abbildung 7) um damit eine adaptive Regelung des Systems, sowie dessen Vernetzung zu ermöglichen. Im Projekt „KompACT“ wird zudem bereits an einem kompakt bauenden Dampferzeuger im Kraftwerksbau geforscht.

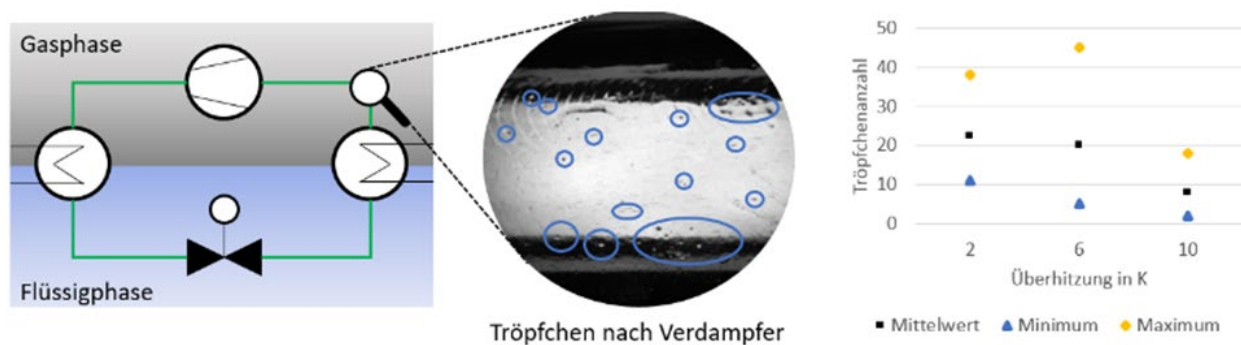


Abbildung 7: Optische Charakterisierung der Tröpfchenbildung nach dem Verdampfer (Vorarbeiten ENE)

Vorarbeiten MSS

Es ist geplant, den Verdampfungsprozess mittels partikelbasierter SPH Methode zu simulieren. Der Antragsteller ist gut ausgewiesen im Bereich der Partikelsimulationen. Dies betrifft zum einen Methoden, die die Dynamik physikalischer Partikel auflösen (Granulatdynamik, DEM) und zum anderen Methoden, bei denen Quasiteilchen verwendet werden, um kontinuumsmechanische Probleme zu diskretisieren, oder um abstrakte Größen zu repräsentieren. Auf dem Gebiet der Granulatdynamik wurde z.B. in die Interaktion eines Teilchenstrahls mit Hindernissen simuliert. Hierbei handelt es sich um ein Beispiel, bei dem sich ein Granulat wie eine spezielle Flüssigkeit verhält. Außerdem wurde dieser Ansatz weiterverfolgt und eine Methode zur Kontinuums-Simulation von Granulaten entwickelt. Bei der DSMC Methode wird die Dynamik von Quasiteilchen simuliert, um die Boltzmann Gleichung zu lösen. Damit wurden sowohl die Mischung als auch die reaktive Strömung zweier Gase auf der Mikroskala studiert. Für die Bearbeitung dieses Projektes wurde die SPH Methode zur Simulation von Flüssigkeiten mit der Position-Based-Dynamics Methode gekoppelt, um die Interaktion von Flüssigkeiten und deformierbaren Festkörpern zu simulieren. Diese Methode erlaubt es, z.B. die im Projekt relevante Benetzung und Tröpfchenbildung abzubilden (Abbildung 8 links). Weitere relevante, aber bislang noch nicht veröffentlichte Vorarbeiten betreffen die SPH-Simulation von laserinduzierten Schmelzprozessen von Metallen im Bereich der additiven Fertigung (Abbildung 8 rechts). Die hier gewonnen Erkenntnisse zur Simulation des fest-flüssig Phasenübergangs können auf den im Projekt relevanten Übergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase übertragen werden.

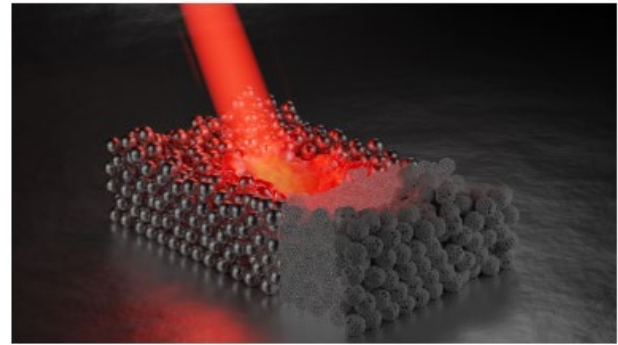
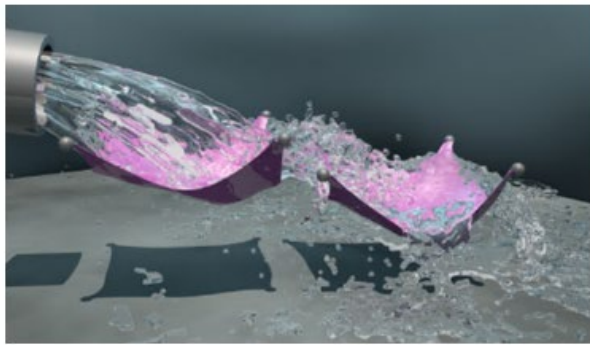


Abbildung 8: SPH Simulation der Festkörper-Flüssigkeit Interaktion inklusive Benetzung und Tröpfchenbildung (links) und SPH Simulation des Laserstrahlschmelzens bei der additiven Fertigung inklusive Fest-Flüssig-Phasenübergang (Mitte).

Ziele und Arbeitsprogramm

Ziel des Projektes ist es, die Tröpfchenbildung in einer Kältemaschine am Verdampferaustritt bei gleichbleibend geringer Überhitzung zu reduzieren, um damit den Verdampfer hinsichtlich Bauraum, Effizienz und Stabilität zu optimieren. Mithilfe von Simulationen werden Verbesserungspotentiale der Topologie identifiziert und im Wechselspiel mit Experimenten qualifiziert. Im Projekt wird hierzu die gemeinhin als gegeben angenommene Geometrie des Wärmeübertragers so gestaltet, dass es zu einer homogenen Verdampfung kommt. Hierzu kommen Simulationen zum Einsatz, die sowohl die Mehrphasenprozesse im Wärmeübertrager, als auch die durch das Gesamtsystem aufgeprägten Randbedingungen detailliert abbilden. Mit diesen Simulationen können die im Experiment kaum zugänglichen Vorgänge im Wärmeübertrager analysiert und verstanden werden. Zudem ermöglichen die Simulationen eine schnelle und kostengünstige modellbasierte Optimierung. Zur Validierung der Simulations- und Optimierungsergebnisse werden Experimente an einem Versuchsstand mit Durchfluss-Schauglass durchgeführt, womit die dampfförmige Kältemittelströmung nach dem Wärmeübertrager mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert werden kann. Daraus ergeben sich folgende Arbeitspakete:

AP 1: Modellierung und SPH Simulation des Verdampfers (MSS)

Ein detailliertes Simulationsmodell der Vorgänge im Wärmeübertrager auf Komponentenebene wird entwickelt und implementiert. Damit können die Tröpfchengröße, die Tröpfchenanzahl und die Tröpfchengeschwindigkeit am Verdampferaustritt simuliert, und somit topologische Einflussgrößen identifiziert werden.

AP2: Konfiguration und Weiterentwicklung Versuchsstand (ENE)

Der bereits vorhandene Versuchsstand und insbesondere die Messtechnik werden so konfiguriert und weiterentwickelt, dass ein Abgleich mit der Simulation möglich wird.

AP3: Simulation des Gesamtsystems (ENE)

Da der Verdampfer in einem dynamischen System mit wechselnden Randbedingungen eingebunden ist, wird in diesem Arbeitspaket die hochauflösende SPH Simulation des Wärmeübertragers in eine Systemsimulation des gesamten Kälteaggregates integriert.

AP 4: Verifikation der SPH Simulationen am vorliegenden Verdampfer (ENE+MSS)

Im Wechselspiel aus Experiment und Simulation wird die prognostische Validität der Simulationsverfahren sichergestellt.

AP5: Physics-Informed-Neural-Network-Simulation der Verdampfung (MSS)

Die modellbasierte Optimierung der Geometrie des Wärmeübertragers erfordert eine Simulation des Prozesses, die in kürzester Zeit vorhersagt, ob die gerade getestete Geometrie zielführend ist. Die entwickelte SPH Simulation bildet den Prozess zwar detailgetreu ab, ist aber zu ineffizient hierfür. Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, ein neuronales Netz so zu trainieren, dass es die dem Verdampfungsprozess zugrundeliegende Physik erlernt und die Dynamik des Systems vorhersagen kann. Während das Training eines solchen Physics-Informed-Neural-Network (PINN) sehr aufwendig ist, erfordert die anschließende Vorhersage eines Zeitschrittes kaum Rechenzeit.

AP 6: Modellbasierte Optimierung der Topologie des Verdampfers (MSS)

Z.B. durch evolutionäre Algorithmen oder auch konventionelle gradientenbasierte Verfahren wird mit Hilfe der PINN-Simulationen die Geometrie des Wärmeübertragers so optimiert, dass eine möglichst homogene Verdampfung stattfindet.

AP 7: Verifikation der Optimierungsergebnisse (ENE)

Es wird ein Wärmeübertrager entsprechend der durch die Simulation vorhergesagten Optimalgeometrie angefertigt, in den Versuchsstand integriert und in situ getestet.

Strukturbildung für die Verbundforschung am EnCN

Das vorgeschlagene Projekt befasst sich mit der effizienten Energienutzung in der Kältetechnik und ist aus Sicht der Antragsteller den Forschungsschwerpunkten "Energieeffiziente Gebäudetechnik" und "Intelligente Energiesysteme" zuzuordnen. Für die beabsichtigte simulationsbasierte Optimierung des Wärmeübertragers ist ein enger Austausch zwischen der Arbeitsgruppe ENE (experimentelle Untersuchungen, Simulation Systemebene) und dem MSS (Simulation Komponentenebene) unerlässlich und fördert so die institutsübergreifende Zusammenarbeit am EnCN. Das Projekt wird im Wesentlichen durch zwei Doktorandinnen oder Doktoranden getragen. Die Promotion in der Arbeitsgruppe ENE wird als kooperative Promotion mit der FAU durchgeführt. Zudem ist ein Antragsteller selbst als Nachwuchswissenschaftler einzustufen. Das Projekt bindet so gezielt den wissenschaftlichen Nachwuchs am EnCN ein. Der Fokus des Projektes liegt auf der Kältetechnik. Die erzielten Ergebnisse können jedoch auch in der Wärmepumpen-, Verfahrens- und Kraftwerkstechnik sowie der Abwärmenutzung relevant sein und legen so weitergehende Verbundvorhaben nahe. Das Projekt hat aus Sicht der Antragsteller das Potential, die führende Marktposition deutscher Hersteller längerfristig zu stärken. Die Arbeitsgruppe ENE ist mit dem relevanten Versuchsstand am EnCN verortet, die Simulationsarbeiten durch den MSS können ortsunabhängig durchgeführt werden, die Betreuung kann durch regelmäßige Treffen vor Ort und Videoschaltungen erfolgen. Das Projekt kann problemlos in den Räumen des EnCN bearbeitet werden. Der Versuchsstand muss für das Projekt zwar angepasst und weiterentwickelt werden, große Investitionen in Geräte oder Infrastruktur sind jedoch nicht notwendig.

Geschäftsstelle



Geschäftsführer

Markus Rützel
Energie Campus Nürnberg

E-Mail
Markus.Ruetzel@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 99122

Web
www.encn.de

GESCHÄFTSSTELLE

Projektbericht 2022

Zur Koordination der Aktivitäten und zur Unterstützung des Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und der Wissenschaftlichen Leitung selbst hat der EnCN eine Geschäftsstelle eingerichtet, welche aus EnCN-Fördermitteln finanziert wird. Diese Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Sie ist der Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik und repräsentiert gemeinsam mit der Wissenschaftlichen Leitung den EnCN nach außen, betreut die Räumlichkeiten und die Infrastruktur. Der EnCN wird bei seinen Aktivitäten und insbesondere bei seiner Öffentlichkeitsarbeit vom Förderverein EnCN e.V. unterstützt und arbeitet eng mit der Geschäftsstelle des EnCN e.V. zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind bei der FAU angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.

1 Aktivitäten der Geschäftsstelle

1.1 Unterstützung der Forschungsaktivitäten

Die Geschäftsstelle koordiniert und organisiert die Aktivitäten in den einzelnen Forschungsbereichen, insbesondere bei organisatorischen Aufgaben und durch Förderung der Vernetzung, Kontaktvermittlung zu externen Projektpartnern und beim Betrieb der Infrastruktur.

Studie „Wasserstoff in der Metropolregion Nürnberg – Analyse der Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen“

Im Rahmen der Studie „Wasserstoff in der Metropolregion Nürnberg – Analyse der Kompetenzen, Chancen und Herausforderungen“ spielte die Geschäftsstelle des Energie Campus Nürnberg (EnCN) eine entscheidende Rolle bei der Planung, Koordination und dem Management des Projekts. Diese Studie, initiiert und finanziert durch die Ausschreibung der Stadt Nürnberg, die der EnCN mit seinem Antrag und Konzept gewinnen konnte, zielte darauf ab, das Potential von Wasserstoff als nachhaltige Energiequelle für die Region zu evaluieren.

Die Geschäftsstelle war verantwortlich für die sorgfältige Organisation und Überwachung aller Studienaktivitäten, von der Definition der Ziele über die Auswahl und Koordination der beteiligten Partner bis hin zur Sicherstellung der Einhaltung wissenschaftlicher Standards. Ein wesentlicher Teil ihrer Arbeit bestand darin, die erzielten Ergebnisse zu kommunizieren und zu verbreiten, indem sie relevante Stakeholder, Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit durch Workshops, Konferenzen und Publikationen informierte.

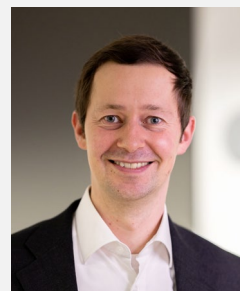
Als Bindeglied zwischen Wissenschaft und politischen Entscheidungsträgern trug die Geschäftsstelle maßgeblich zum Austausch von Wissen und Erfahrungen bei und förderte so die Entwicklung und Implementierung der Wasserstofftechnologien. Die Studie leistet einen wichtigen Beitrag zur Bewertung und Nutzung von Wasserstoff als Teil einer nachhaltigen Energiezukunft in der Region.

Projektantrag „Klimapakt2030plus“

Innerhalb des „Klimapakt2030plus“ Projekts nahm die Geschäftsstelle des EnCN eine zentrale koordinierende Rolle ein, insbesondere bei der Kommunikation mit dem Projektkonsortium und der Antragerstellung für das Teilprojekt EMN_SIM. Die Geschäftsstelle war maßgeblich an der Konzeption und Einreichung des Projektantrags beteiligt, indem sie die Idee eines digitalen Zwillings der Energieströme, basierend auf vorherigen Erfahrungen aus dem Projekt ESM-Region, in den

KONTAKT

Markus Rützel
Geschäftsführer



Telefon
+49 911 / 5302 99120

Web
www.encn.de

Anschrift
Fürther Str. 250
„Auf AEG“, Gebäude 16
90429 Nürnberg

Vordergrund stellte. Durch die erfolgreiche Antragstellung beim BMBF konnte das Projekt „Klimapakt2030plus“ realisiert werden. Die Geschäftsstelle des EnCN spielte somit eine entscheidende Rolle bei der strategischen Ausrichtung und der operativen Umsetzung des Projekts, indem sie die oberste Ebene der Kommunikation mit dem Konsortium leitete und für die Koordination des Teilprojekts EMN_SIM verantwortlich war. Diese Aufgaben unterstreichen die Bedeutung der Geschäftsstelle als Schnittstelle zwischen Forschung, Förderung und der praktischen Realisierung von Maßnahmen zur Unterstützung der Energiewende.

Einführung von energieeffizienten Maßnahmen

Angesichts der Energiekrise, die durch den Konflikt in der Ukraine ausgelöst wurde, hat der Energie Campus Nürnberg (EnCN) proaktiv Maßnahmen ergriffen, um seinen Energieverbrauch effizienter zu gestalten. In Zusammenarbeit mit Cenero.one initiierte der EnCN ein Pilotprojekt zur Implementierung eines innovativen Monitorings- und Energiemanagementsystems. Der Besprechungsraum "Energie" diente als Testumgebung für dieses Vorhaben, mit dem Ziel, die Effizienz und Effektivität des Systems zur Optimierung des Energieverbrauchs umfassend zu bewerten, bevor eine mögliche Ausweitung auf das gesamte Gebäude in Erwägung gezogen wird.

Der Besprechungsraum "Energie" bot ideale Voraussetzungen für eine kontrollierte Bewertung des Systems. Cenero.One stellte eine Plattform zur Verfügung, die eine präzise Erfassung und Analyse von Echtzeit-Daten zum Energieverbrauch ermöglicht. Durch diese fortgeschrittene Überwachung können nicht nur potenzielle Einsparungen identifiziert, sondern auch zielgerichtete Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz abgeleitet werden.

Die erfolgreiche Durchführung dieses Pilotprojekts verdeutlicht das Engagement des EnCN, innovative und nachhaltige Lösungen zu nutzen. Diese dienen nicht nur der Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen, sondern etablieren auch eine solide Grundlage für ein intelligentes Energiemanagement am Campus. Darüber hinaus eröffnet das System die Möglichkeit, wertvolle Daten für die Forschung zu sammeln. Die Erhebung von Daten zur Energieverbrauchs- und Raumluftqualität im gesamten Gebäude schafft eine hochqualitative Datenbasis, die zukünftige Forschung in diesem Bereich vorantreiben wird.

Das positive Feedback zum System und seine potenzielle Rolle bei der Optimierung des Energieverbrauchs unterstreichen die Notwendigkeit, solche Technologien weiterhin zu evaluieren und zu implementieren. Dieser Ansatz trägt maßgeblich zur nachhaltigen Entwicklung des EnCN bei und stärkt seine Position als innovativer Akteur im Bereich Energieeffizienz und Nachhaltigkeit. Durch die Vorbildfunktion des EnCN wird zudem die Bedeutung der Integration von fortschrittlichen Energiemanagementsystemen in die alltägliche Praxis hervorgehoben, um den Herausforderungen der Energiekrise wirksam zu begegnen.

Koordination Strukturbildende Verbundprojekte

Die Geschäftsstelle des EnCN spielte eine Schlüsselrolle bei der Förderung der strukturfördernden Verbundprojekte. Sie übernahm die Projektträgerschaft und war verantwortlich für die Erstellung der Ausschreibung, die Koordination der Bewerbungen sowie die Organisation von Workshops. Darüber hinaus koordinierte sie die Gutachter und stand in enger Abstimmung mit den beteiligten Partnern sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kultur. Diese zentrale Koordinations- und Unterstützungsfunktion der Geschäftsstelle ermöglichte eine effiziente Durchführung des Auswahlprozesses und gewährleistete, dass die Projekte effektiv zur Stärkung der Vernetzung innerhalb des EnCN und zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses beitragen. Durch diese gezielte Unterstützung konnten die Verbundprojekte erfolgreich umgesetzt werden, was die Bedeutung der Geschäftsstelle für die Realisierung der Ziele des EnCN unterstreicht.

Vernetzung mit externen Projektpartnern

Die Geschäftsstelle fördert aktiv die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie, um innovative Technologien schneller zur Marktreife zu bringen. Durch gemeinsame Projekte und dem Austausch von Expertise werden Forschungskapazitäten gestärkt und neue Perspektiven für beide Seiten eröffnet. Dieser Ansatz beschleunigt nicht nur die Entwicklung neuer Technologien, sondern trägt auch zur Erschließung neuer Geschäftsfelder und Märkte für die Unternehmen der Metropolregion Nürnberg bei.

Indem die EnCN-Forschenden und Unternehmen zusammenarbeiten, können komplexe Herausforderungen effizienter bewältigt und schnellere Lösungen entwickelt werden. Diese Kooperationen fördern die wissenschaftliche Exzellenz und stärken die Forschungskapazitäten.

Im Jahr 2022 hat die Geschäftsstelle kontinuierlich daran gearbeitet, die Vernetzung zwischen Wissenschaftlern und potenziellen Projektpartnern durch eine Vielzahl von Formaten zu fördern. Diese Bemühungen umfassen die Organisation von Workshops, die Fortführung und Erweiterung langjähriger Kooperationsvereinbarungen sowie die Initiierung und Vertiefung von Gesprächen über gemeinsame Projekte in innovativen Forschungsfeldern. Die nachstehende Tabelle zeigt beispielhafte Vernetzungsaktivitäten im Jahr 2022.

Tabelle 2 – Vernetzungsaktivitäten für EnCN Wissenschaftler

Aktivität	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
Region Brabant – Forschungsk Kooperation	Prof. Dr. Wolfgang Krcmar, THN, Prof. Dr. Armin Dietz, THN
Vitesco – Forschungsaktivitäten am EnCN	Prof. Dr. Armin Dietz, THN
Siemens Energy	Prof. Dr. Ulrich Ulmer, THN, Prof. Dr. Thomas Metz, THN
Cenero	Prof. Dr. Ulrich Ulmer, THN, Prof. Dr. Thomas Metz, THN
N-ERGIE – diverse Forschungsprojekte	Prof. Dr. Frank Opferkuch, THN, Prof. Dr. Reinhard German, FAU, Prof. Dr. Jürgen Karl, FAU, Prof. Dr. Verena Tiefenbeck, FAU, Prof. Dr. Tilman Botsch, THN
VAG - Netzwerkevent	Hr. Rützel, EnCN
Stadt Nürnberg - Wissenschaftsstadt	Hr. Rützel, EnCN
Greenhouse OPV	Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, FAU, Prof. Dr. Armin Dentel, THN
VGN – Prognose von Verkehrsdaten	Prof. Dr. Marco Pruckner, Uni Würzburg
Mainova - Forschungsaustausch	Prof. Dr. Jürgen Karl, FAU
Abfallwirtschaftsbetrieb Stadt Nürnberg	Prof. Dr. Astrid von Blumenthal, HS Ansbach

1.2 Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses

EnCN Energiepreis

In Zusammenarbeit mit dem EnCN verlieh der Förderverein EnCN e.V. erstmals im Jahr 2017 den Energiepreis. Der Preis ist mit insgesamt 3.000 € dotiert und wird für exzellente Bachelor- und Master-Arbeiten aus den Gründerhochschulen des EnCN vergeben. Jährlich werden verschiedene Abschlussarbeiten prämiert. Dabei teilen sich die Gewinner die Prämie. Der Geschäftsstelle war gemeinsam mit der EnCN e.V. Geschäftsstelle für die Koordination und Organisation rund um den Preis verantwortlich. Die nachstehende Tabelle zeigt die Preisträger für 2022.

Tabelle 3 – Preisträger des EnCN-Energiepreises 2022

Name	Forschungs- bereich	Titel der Arbeit
Albuscheit, Markus	EMD	Zertifizierung der Nachhaltigkeit der CO ₂ -reduzierten Wasserstoffproduktion
Elhaus, Nora	Speicher	Vorhersage der Gasproduktion in Klärwerken
Karrer, Jörg	Effizienz	Herstellung von Geopolymeren aus Reststoffen
Lang, Maren	Speicher	Design und Inbetriebnahme eines Laborreaktors für Elektromethanogenese
Lehmeier, Thomas	EMT	Untersuchung spektral optimierter Steuerverfahren
Meindl, Markus	EMT	Reverse Engineering des Wasserstoffsystems eines kommerziellen Brennstoffzellenfahrzeugs

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
Mitlöhner, Sophie	Netze	Engpassvermeidung durch Batteriespeicher in Kombination mit Windparkabregelung
Pfefferer, Ulrike	EMD	Regional smart markets for market-based congestion management in Germany
Schmidt, Michael	Effizienz	Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Energieeffizienz von Synchron und Transversalmaschinen



Abbildung 1: Gewinner des EnCN-Energiepreises

Reisestipendium

Der Förderverein EnCN e.V. vergibt seit 2019 Reisestipendien, um Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler zu motivieren und zu ermutigen, ihre Forschungsergebnisse auf internationalen Konferenzen vorzustellen und zu diskutieren. Es ist verpflichtend, dass das EnCN Logo auf den Präsentationsunterlagen sichtbar ist und der EnCN auch namentlich erwähnt wird. Dadurch wird der EnCN auch über die bayerischen und deutschen Grenzen hinaus sichtbar und bekannt gemacht. Die Preisträger erhielten jeweils 300 €.

Tabelle 4: Preisträger des EnCN-Reisestipendiums 2022

Name	Forschungsbereich	Veranstaltung, Art der Präsentation
Adamchuk, Nazar	Effizienz	ECIGmeeting 2022, Vortrag
Betzold, Christina	Effizienz	14. REHVA HVAC World Congress "CLIMA2022", Vortrag
Hummel, Sebastian	Effizienz	14. REHVA HVAC World Congress "CLIMA2022", Vortrag
Raab, Alexander	Netze	2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vortrag
Steinberger, Marc	Erneuerbare Energien	Baltic Conference Series, Vortrag
Lang, Lukas	Energiemarktdesign	17th IAEE European Energy Conference, Vortrag
Rabenstein, Lukas	Effizienz	International Conference on Electrical Machines ICEM'2022, Vortrag
Kugler, Felix	Effizienz	Future Materials 2022, Vortrag

1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Veranstaltungen

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit beteiligte sich der EnCN 2022 wieder aktiv an verschiedenen Veranstaltungen.

- Hannover Messe: Messestand
- Lange Nacht der Wissenschaften: Vorträge, Führungen und Ausstellungen



Abbildung 2: Impressionen der Veranstaltungen

Auch die Unterstützung bei der Organisation von Konferenzen der Wissenschaftler und Veranstaltungen der FAU gehörte zum Aufgabenrepertoire der Geschäftsstelle.

- Green Hydrogen Conference mit Südkorea
- NextGeneration Solarenergie Konferenz
- FAU Wissenwollen: „Bericht Weltklimarat“, „Das Lebensende“, "Empty Nest"



Abbildung 3: Impressionen der Veranstaltungen

Schülermarketing

Schüler:innen sind die Zukunft unserer Gesellschaft und benötigen eine fundierte Ausbildung. Für den EnCN ist Nachwuchsförderung sehr wichtig. Deshalb beginnt die Zusammenarbeit bereits mit der schulischen Ausbildung. Wir sehen es als unsere Aufgabe an, junge Menschen für einen Ingenieurberuf zu begeistern und Interesse an einem Studium in Nürnberg oder Erlangen wecken zu können. 2022 fanden dazu verschiedene Veranstaltungen statt:

- Weiterbildung Fachschaftslehrer Physik für Gymnasien
- KinderUni

In Kooperation mit der FAU und der Stadt Nürnberg veranstaltete der EnCN wieder die KinderUni zu folgenden Themen:

- 14.06. Woher kommt eigentlich Strom
- 15.07. Philosophie für Anfänger
- 29.07. Das Gehirn
- 02.11. Philosophie für Anfänger
- 02.11. Sensory Sciences
- 04.11. Woher kommt eigentlich Strom

Online-Veranstaltungsformat „Frag den Experten“

Aufgrund der steigenden Energiepreise verfolgte der EnCN das Ziel, die breite Öffentlichkeit über aktuelle Entwicklungen in der Energieforschung zu informieren und auch Antworten der Wissenschaft auf Energiesparmaßnahmen zu geben. Daraus entstand die Online-Veranstaltungsreihe „Frag den Experten“, die von Dezember 2022 bis März 2023 wöchentlich jeden Mittwoch durchgeführt wurde. Die Vorträge sind auch auf dem EnCN YouTube Kanal verfügbar.

Folgende Themen wurden adressiert:

- Innovative Technologien für dezentrale intelligente Energiesysteme - Dr. Richard Öchsner, Fraunhofer IISB
- Höherauslastung der Stromnetze am Beispiel von Netzboostern - Johannis Porst, FAU
- Betriebserfahrungen aus den Energiespeicherhäusern Herzabase - Prof. Dr. Arno Dentel, TH Nürnberg
- Ökodesign-Anforderungen an Elektromotoren und Antriebssysteme - Prof. Dr. Andreas Kremser, TH Nürnberg
- Bewertung von Einsparmaßnahmen im Einfamilienhaus - Prof. Dr. Arno Dentel, TH Nürnberg
- Carnot-Batterien als flexible Energiespeicherlösung der Zukunft? - Maximilian Weitzer, FAU
- Energieeffizienzmaßnahmen einer Fertigung für Bahntransformatoren - Dr. Horst Renner, Siemens Energy
- Aktuelle Herausforderungen für die Systemstabilität elektrischer Netze - Dr. Gert Mehlmann, FAU
- Energieeffizienz in Leichtmetallgießereien - Prof. Dr. Wolfgang Schlüter, HS Ansbach
- Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff: Optionen von Erzeugung bis Nutzung - Dr. Sebastian Kolb, FAU

Marketingkonzept für Energiesparmaßnahmen der FAU und THN

Aufgrund der europaweit ungewissen Energieversorgungssicherheit und der gestiegenen Kosten will die FAU und THN auf einen eventuell auftretenden Energieengpass im Wintersemester 2022/23 vorbereitet sein. Gleichzeitig wollen sie proaktive Maßnahmen ergreifen, um Energie in ihren Gebäuden einzusparen. Das Nutzungsverhalten jeder einzelnen Person kann dazu beitragen, den Energieverbrauch deutlich zu reduzieren.

Durch geeignete Kommunikationsmaßnahmen sollen Studierende und Mitarbeiter motiviert werden, Energiesparmaßnahmen umzusetzen. Darüber hinaus sollen die Stakeholder und Öffentlichkeit von den durchgeführten Aktivitäten erfahren, um so die Anerkennung und Beliebtheit der Hochschulen zu erhöhen. Die EnCN Geschäftsstelle hat für die beiden Hochschulen ein Marketingkonzept mit verschiedenen Kommunikationsmaßnahmen erstellt und regelmäßig die Maßnahmen z.B. mit dem Green Office der FAU abgesprochen und deren Umsetzung verfolgt. Gleichzeitig fanden verschiedene interne und externe Veranstaltungen zu diesem Thema am EnCN statt.

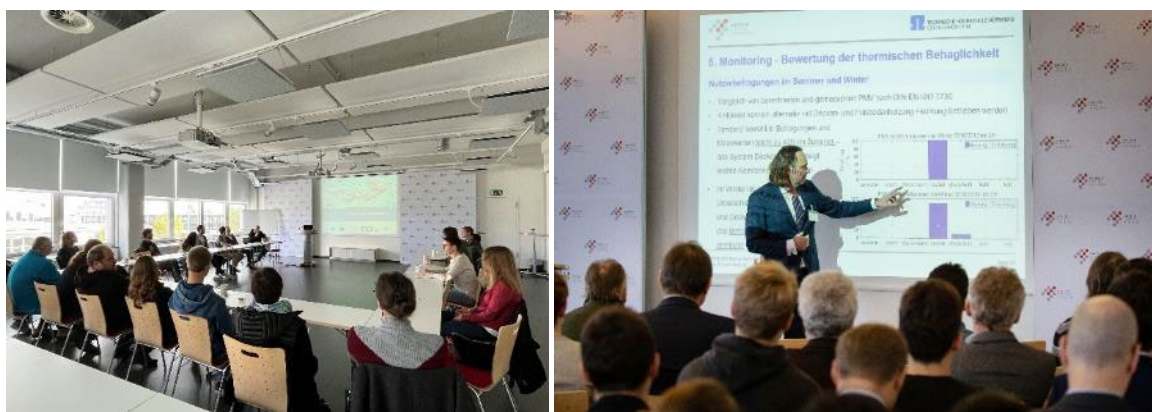


Abbildung 4: Impressionen zu Veranstaltungen Energieeffizienzmaßnahmen

Konzept für Vortragsreihe #FAUinsights – Wasserstoff und Anwendungen

2023 startet eine gemeinsame Vortragsreihe von FAU und EnCN, bei der renommierte Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft die neuesten Entwicklungen aus dem Energiebereich diskutieren, die das Leben schon heute prägen und noch verändern werden. "Wasserstoff und Anwendungen" ist das erste große Thema von #FAUinsights. Das Konzept wurde von der Geschäftsstelle erstellt und sieht ein inhaltliches und technologisches Matchmaking vor, bei dem wissenschaftliche, praxis- und politikorientierte Akteurinnen und Akteure zusammengebracht werden. Diese verschiedenen Meinungen und Erfahrungen werden einem interessierten Publikum zugänglich gemacht, das mit den Experten vor Ort die brennenden Fragen der Zukunft diskutieren kann. Die Geschäftsstelle koordiniert die Referenten und Moderatoren und ist Veranstaltungskoordinator. Die 11 Veranstaltungen finden im EnCN ab April 2023 statt.

Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten sowie dessen Forschungsthemen und Veranstaltungen waren im Berichtszeitraum mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse.

Tabelle 5 – Presseübersicht

Zeitung	Zeitung
Bayerische Gemeindezeitung	Münchner Merkur
Bayerische Rundschau	Neue Presse Coburg
Bayerische Staatszeitung	Nordbayerischer Kurier
Bote vom Haßgau	Nürnberger Nachrichten
Coburger Tageblatt	Nürnberger Stadtanzeiger
DIE KITZINGER	Nürnberger Zeitung
Frankenpost	Passauer Neue Presse
Fränkischer Tag	Saale-Zeitung
Handelsblatt	Schwäbische Zeitung
Handelsblatt online	Schweinfurter Tagblatt
IZ Aktuell	Straubinger Tagblatt
Landshuter Zeitung	Süddeutsche Zeitung
Main-Post	taz. Die Tageszeitung
Mittelbayerische Zeitung	Volkszeitung Schweinfurt
Münchner Abendzeitung	WELT ONLINE
	Wirtschaftszeitung

1.4 Organisation

Die Trägerschaft der Geschäftsstelle liegt seit 1.1.2022 bei der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Zum Ende der Förderphase 2021 gab es einen größeren personellen Wechsel in der Geschäftsstelle. Im Laufe des Jahres 2022 wurden 4 der 5 Mitarbeiter in der Geschäftsstelle neu eingestellt. Die Geschäftsstelle besteht namentlich aus nachfolgenden Mitarbeitenden: dem Geschäftsführer Markus Rützel, der Assistentin Karin Zarrabi, dem Forschungskoordinator Dr. Thomas Pircher, dem Gebäudemanager Thomas von Streng und der Projektmanagerin Kristin Zeug.



*Abbildung 5: Mitarbeiter der Geschäftsstelle des Energie Campus Nürnberg
(v.l.n.r. Markus Rützel, Kristin Zeug, Dr. Thomas Pircher, Karin Zarrabi)*

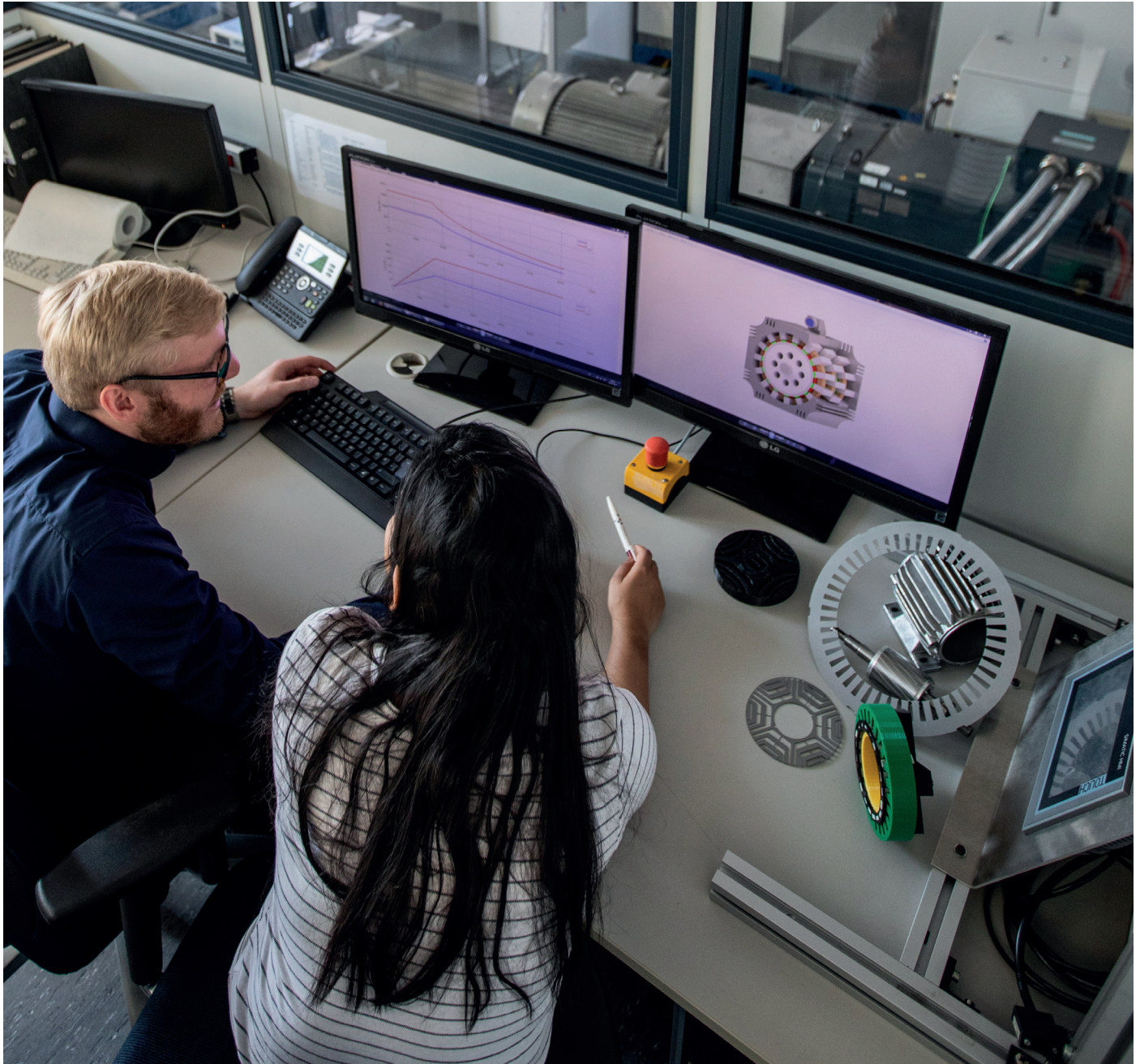
2 Schlussworte

Die vorliegenden Ergebnisse im Jahresbericht verdeutlichen eindrücklich den kontinuierlichen Erfolg und die anhaltend sehr guten Forschungsergebnisse des EnCN im Jahr 2022. Trotz der großen Herausforderungen, wie der anhaltenden Corona-Pandemie und der Reduzierung der Forschungsmittel für die strukturbildenden Verbundprojekte, hat der EnCN seine Resilienz und Anpassungsfähigkeit unter Beweis gestellt, indem die Fördermittelverteilung effektiv angepasst wurden und so Forschungsziele weitestgehend erreicht wurden. Der Beginn der dritten Förderperiode markiert mit Ziel der Verstetigung einen bedeutenden Meilenstein in der Geschichte des EnCN.

Das Jahr 2022 war ein großer Umbruch für die Geschäftsstelle des EnCN. Wesentlich waren die umfangreichen personellen Wechsel in der Geschäftsstelle, einschließlich der Ernennung von Markus Rützel zum neuen Geschäftsführer sowie Dr. Thomas Pircher als Wissenschaftskoordinator. Das neue Team steht für einen neuen Start und bringt neue Perspektiven und Optionen für den EnCN. Wir danken Dr. Buchele, Frau Dimopoulou und Herrn Schlaffer für ihre wertvollen Beiträge zum Erfolg des EnCN. Durch den Wegfall der Trägerschaft des ZAE gab es zusätzlich eine Restrukturierung der Prozesse und Abläufe in die Organisation der FAU. Besonders hervorzuheben ist die Übernahme zusätzlicher Verantwortungsbereiche, die aus der Integration der Aufgaben des Nuremberg Campus of Technology (NCT) resultieren. Die Geschäftsstelle verantwortet und unterstützt nun beide Forschungsplattformen EnCN und NCT. Auf Basis des Strategiekonzepts des Evaluationsberichts wurde die Zielsetzung der Geschäftsstelle neu ausgerichtet. Neben den bisherigen Aufgaben wurde die Geschäftsstelle beauftragt, durch die Akquise von Forschungs- und Drittmittelprojekten, Generierung neuer Dienstleistungen und Kooperationen am Erfolg des EnCN aktiv mitzuwirken. Diese Entwicklungen tragen maßgeblich dazu bei, die Grundlage für zukünftige Erfolge zu schaffen und die Position des EnCN sowie des NCT im wissenschaftlichen und technologischen Umfeld zu stärken. Die Geschäftsstelle steht somit nicht nur für Kontinuität im Wandel, sondern auch für eine fortschrittliche Gestaltung der Zukunft, die durch eine klare Vision und die Umsetzung strategischer Maßnahmen gekennzeichnet ist.

FORSCHUNGSBEREICH

Effizienz



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar
Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik

E-Mail
Wolfgang.Krcmar@th-nuernberg.de

Telefon
+49 911 / 5880 1173
+49 911 / 5880 3110

Web
www.encn.de/effizienz

Projektbericht 2022

Ein verantwortungsvoller Umgang mit Energie und Ressourcen erfordert eine Verbrauchsminimierung durch maximale Energieeffizienz. Die Steigerung der Energieeffizienz trägt zu allen Zieldimensionen der Energiepolitik – der Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit – bei und ist eine tragende Säule der Energiewende. Im Forschungsschwerpunkt EFFIZIENZ werden Forschungsarbeiten zu den Themenstellungen „Energieeffiziente Gebäude“ und „Energieeffiziente Industrie“ durchgeführt.

Im Teilprojekt „Energieeffiziente Gebäude“ liegt der Fokus auf der Entwicklung neuer, hochwärmedämmender Wandbaustoffe sowie multifunktionaler Fassadenelemente. Außerdem werden neue Lüftungskonzepte für Innenräume zur Risikoreduzierung aerosolgebundener Infektionskrankheiten und eine Mustersanierung mehrgeschossiger Mehrfamilienhäuser demonstriert.

Im Teilprojekt „Innovative energieeffiziente Antriebe“ werden neue Konzepte für Motoren und Antriebsstränge sowie deren Steuerung erarbeitet. Außerdem wird ein neuer Prüfstand für elektrische Hochdrehzahlantriebe aufgebaut und ein innovatives Querstrom-Fahrtwindgebläse mit hoher Ausblasgeschwindigkeit entwickelt.

Die Forscher im Teilprojekt „User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben“ arbeiten u.a. an intralogistischen Energieeffizienz-Maßnahmen für die Giesserei-Industrie, wobei Energiedaten erfasst, nutzerbezogen ausgewertet und visualisiert werden. Außerdem werden Konzepte zur Abwärmeverstromung von Thermoprozessanlagen mittels Mikrodampfturbine sowie zur numerischen Auslegung von Gussbauteilen entwickelt. Ein weiteres erfolgversprechendes Projekt ist die Leistungssteigerung von Windenergieanlagen durch eine Windbeeinflussung mit Hilfe von vorgebauten, aus Bäumen bestehenden, sogenannten WindBreaks.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar

Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik



E-Mail

wolfgang.krcmar@th-nuernberg.de

Telefon

+49 911 / 5880 1173
+49 911 / 5880 3110

Web

www.encn.de

1 Energieeffiziente Gebäude

Einführung

Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, strebt die Bundesregierung an, bis zum Jahr 2050 den derzeitigen Primärenergie-Verbrauch um bis zu 80 % durch den Einsatz erneuerbarer Energien sowie Energieeinsparungs-Maßnahmen abzusenken. 35 % der gesamten in Europa bereitgestellten Energie wird im Gebäudesektor verbraucht. 36 % aller emittierten Treibhausgase werden durch den Gebäudebestand verursacht. Im durchschnittlichen Einfamilienhaus (Bestandsgebäude) verursacht die Heizung über 75 % des Gebäude-Gesamtenergiebedarfs. Aus der Analyse der Daten geht hervor, dass die Reduzierung des Energiebedarfs von Wohn- und Nichtwohn-Gebäuden mit zu den wichtigsten Maßnahmen zur Absenkung von CO₂-Emissionen und zum Klimaschutz zählt.

Ein weiterer Aspekt ist die Verknappung von Wohnraum und die ständige Zunahme der Mietpreise, insbesondere in Ballungsgebieten. Auch die Energiepreise für Strom, Erdgas, Heizöl und Benzin steigen ständig. Diese Kosten müssen aber auch künftig für den Normalverbraucher finanzierbar bleiben. Da eine Absenkung der Energiepreise bis auf weiteres nicht zu erwarten ist und fossile Energiereserven knapper werden, kommt dem Nichtverbrauch von Primärenergie durch energieeffiziente Gebäude eine entscheidende Rolle zu. Um den Energieverbrauch abzusenken, besteht die Notwendigkeit, einerseits die passiven Komponenten der Gebäudehüllen mit verbesserter Wärmedämmung auszurüsten; andererseits müssen die Gebäude mit einer verbesserten technischen Gebäudeausrüstung wie z.B. regenerativer Energiegewinnung, thermischen und/oder elektrischen Speichern und einem leistungsstarken Betriebssystem als aktive Komponenten ausgestattet werden. Sowohl die passiven, als auch die aktiven

Gebäudekomponenten sind gleichermaßen wichtig. Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ unter der Leitung von Prof. Dr. Barbara Hintz und Prof. Dr. Wolfgang Krcmar erforscht, entwickelt und erprobt neuartige Wandbaustoffe mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften, u.a. Mauerziegel, Mauermörtel, Geopolymere, Innen- und Außenputze sowie nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele. Das Ziel besteht praktisch immer in der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit der Wandbau- und Isolierstoffe gegenüber dem Stand der Technik. Gebäude, die mit besser gedämmten Werkstoffen in der Gebäudehülle gebaut bzw. saniert werden, zeichnen sich durch einen geringeren Energieverbrauch aus. Dies führt zur Einsparung von Primärbrennstoffen für die Gebäudebeheizung mit einhergehender Absenkung unnötiger CO₂ – Emissionen. Gleichzeitig wird der Bedarf an regenerativ erzeugter Energie abgesenkt und die Größe des benötigten Batterie- bzw. thermischen Speichers im Gebäude verkleinert.

In der Arbeitsgruppe arbeiteten im Berichtszeitraum 1 Doktorandin und 3 Doktoranden innerhalb von Forschungsprojekten an ihren Promotionen. Darüber hinaus waren ständig ca. 15 Studierende als Wissenschaftliche Hilfskräfte in die Arbeitsgruppe integriert und konnten die erarbeiteten Ergebnisse für ihre Projektarbeiten, Bachelor- und Master-Arbeiten nutzen. Auch im Jahr 2022 hat die Arbeitsgruppe Drittmittel-Einnahmen in bedeutender Höhe eingeworben und die Laborausrüstung weiter ausgebaut.

1.1 „3D-Druck verschiedener Keramik-Proben für Prototypen und Entwicklungsstudien“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; Prof. Dr. Barbara Hintz, Matthias Geyer und Maximilian Dürler

Zielsetzung hierbei war die Herstellung von 3D-gedruckten Probekörpern und Prototypen aus dem originalen Werkstoff für verschiedene Messverfahren und Optimierungsstudien. Diese sollen durch geschickte Parameterwahl die Eigenschaften regulär gefertigter Produkte möglichst gut nachbilden. Zusätzlich soll mittels 3D-Druck von konturnahen Probekörpern für verschiedene Messverfahren, zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit, eine einfachere und zeitsparende Möglichkeit der Probenherstellung zur Verfügung stehen und reguläre zeitaufwändige Verfahren der Probekörper-Herstellung umgangen werden. Weiterhin können Funktionsbauteile direkt gedruckt werden (ohne Mundstück und Negativform) und stehen dadurch schnell für vergleichende Messungen zur Verfügung. Der 3D-Druck der Probekörper dauert je nach Probengröße zwischen 10 Minuten und wenigen Stunden und kann somit effizient und kostengünstig für die Erstellung von Funktions-Prototypen angewendet werden. Ungebrannte Proben, welche nicht mehr benötigt werden, können leicht wieder angefeuchtet und für weitere 3D-Drucke verwendet werden. Abbildung 1 zeigt die Leistungsfähigkeit des 3D-Drucks am Beispiel verschiedener Probekörper aus keramischen Massen.





Abbildung 1: Beispiele für durchgeführte 3D-Druck-Bauteile: Formteil aus Cordierit (links oben), Wärmeleitplatte zur Messung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit und weiterer Materialparameter aus Steinzeug-Ton (rechts oben), Design-Studie zum 3D-Druck aus Fein-Steinzeug (links unten) und Hochlochziegel-Lochbildentwicklung für Parameterstudien aus Ziegel-Ton (rechts unten).

1.2 „GeoBOD – 3D-Druck mit Recycling-Stoffen aus Bauschutt“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energie-effiziente Werkstoffe“; Prof. Dr. Barbara Hintz, Ephrem Mugabo, Matthias Geyer und Maximilian Dürler

Durch die Krisen der heutigen Zeit sind viele Wirtschaftszweige gezwungen, alternative Wege zu gehen. Die Preise für Energie und Rohstoffe sind sprunghaft gestiegen, die weitere Prognose dieser Entwicklung gestaltet sich sehr schwierig. Durch den Einsatz von Geopolymeren aus Recycling- und Baureststoffen als Ersatz für Bindebaustoffe wie z.B. Zement und den 3D-Druck als neuartige Technik für die Erstellung von Gebäuden können Rohstoffe und Primärenergie eingespart werden. So können Stoffkreisläufe geschlossen und Abfall/Deponievolumen vermieden werden (Cradle to Cradle).

Geopolymere sind anorganische, calciumarme Polymere, welche ein amorphes Aluminosilikat-Netzwerk ausbilden. Typische Einsatzstoffe sind Metakaolin, Flugasche, Schlacken und andere Prozessrückstände, die ein gutes Aluminium-zu-Silizium-Verhältnis aufweisen.

Zuerst werden die Silikat- und Aluminat-Tetraeder gelöst, welche sich in der zweiten Phase reorganisieren. Dabei verbinden sich abwechselnd ein Silikat- und ein Aluminat-Baustein. Diese reorganisierten Ketten bilden sich in der dritten Polykondensationsphase zu einem soliden aluminosilikatischen Netzwerk aus (Abbildung 2).

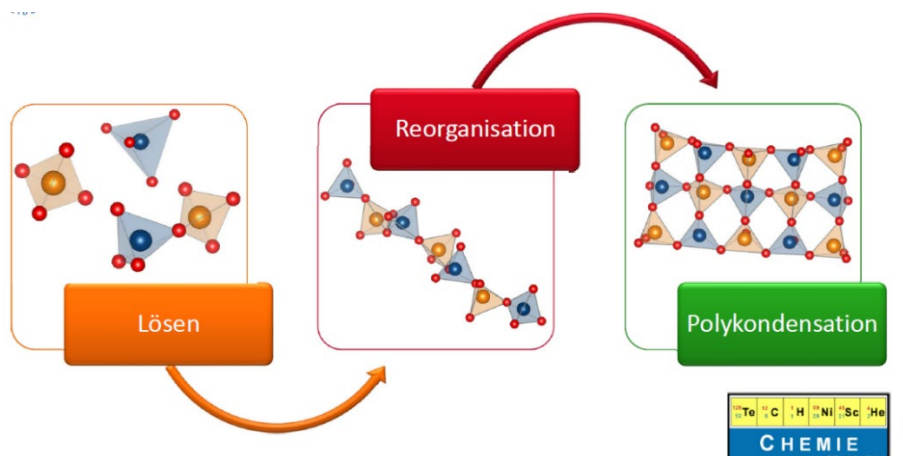


Abbildung 2: Ablauf einer Geopolymerisation mit Lösungsphase der Silikat- und Aluminat-Bausteine, Reorganisation und Netzbildung durch Polykondensation.

Durch den Einsatz des 3D-Drucks als Herstellungsverfahren eröffnen sich neuartige Möglichkeiten zur Erstellung von Gebäuden. Mit der Substitution von handelsüblichem Zement durch Recycling- und Baureststoffe für den 3D-Druck können erhebliche Mengen an Rohstoffen und Energie eingespart werden. Ziel des hier beschriebenen Vorprojekts ist die Entwicklung geeigneter Mischungen für den 3D-Druck von Häusern, um den derzeit eingesetzten Zement/Beton zu ersetzen. Die hierbei entwickelten Geopolymer-Mischungen sollen in einem weiteren Entwicklungsschritt zur Produktreife geführt und im großtechnischen Einsatz Anwendung finden. Dies wird in einem Folgeprojekt mit interessierten Industriepartnern erfolgen.

Im Labor wurden zunächst Druckversuche mit plastischem Ton mittels des 3D-Druckers „PotterBot XL“ durchgeführt, um geeignete Formgebungsparameter und Druckereinstellungen zu erarbeiten. Weitere Versuche zur Herstellung von Geopolymeren mittels 3D-Druck erfolgten mit gemahlenem, sortenreinen Bauschutt. Dafür wurden Ziegelschleifstaub, zerkleinerter Mörtel, Putz und Metakaolin verwendet. Die Probenherstellung erfolgte sowohl mittels Gießformgebung als auch 3D Druck zum Vergleich der technischen Eigenschaften. Für den 3D-Druck von Geopolymeren wurden der Mischung geeignete Plastifizierungsmittel zugegeben. Erste Erfolge wurden mit einer geringen Zugabe von Ligninsulfonat erzielt, so dass sich eine neuentwickelte Geopolymer-Mischung erfolgreich verdrucken ließ (Abbildung 3).

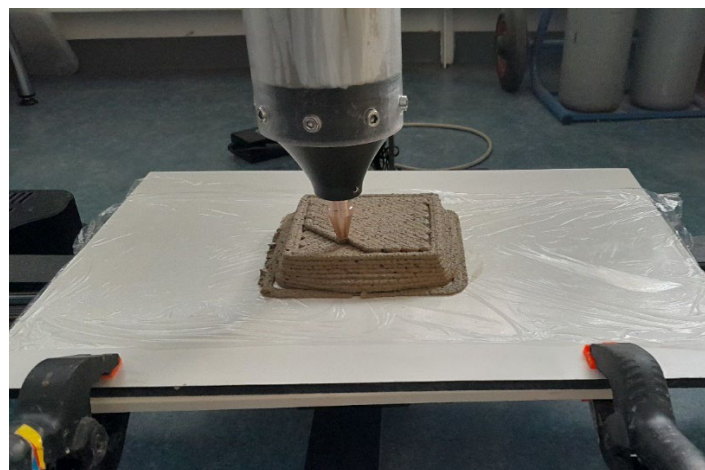


Abbildung 3: 3D-Druck einer Bindebaustoff-Probe mit gutem Druck- und Stabilitätsverhalten als Benchmark für den Geopolymer 3D-Druck.

In künftigen Schritten werden nun weitere Proben mittels 3D-Druck aus verschiedenen Geopolymer-Mischungen hergestellt und anschließend für den 3D-Druck, z.B. mittels Zugabe von weiteren Recycling-Zuschlagstoffen und geeigneten Verflüssigern, optimiert. Das Ziel besteht darin, ein ausreichend schnelles Abbindeverhalten der gedruckten Geopolymer-Formkörper möglichst bei Raumtemperatur zu gewährleisten. Am Ende dieses Vorprojekts ist der Druck eines Mini-Musterhauses mit den Abmessungen 500 mm x 500 mm x 700 mm als „Proof of Concept“ vorgesehen.

1.3 „Geopolymer-Ersatzprodukte für Schamotte- und Calciumsilikat-Plattenware“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; Prof. Dr. Barbara Hintz, Maximilian Dürler und Matthias Geyer

Bei der hier beschriebenen Machbarkeitsstudie besteht das Ziel darin, aus Recycling-Stoffen feuerfeste und wärmedämmende Geopolymer-Ersatzprodukte für „Hafner-Schamotte“ herzustellen. Dabei sollen die technischen Kennwerte (z.B. Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, etc.) der fertigen Geopolymer-Proben nach Möglichkeit dem Original-Produkt aus Hafner-Schamotte entsprechen. Dies gewährleistet im Einsatz eine einfache technologische Verwertbarkeit und gegebenenfalls Mischbarkeit der späteren Produkte (Original Hafner-Schamotte-Platten und Geopolymer-Platten). Zukünftig soll über die Geopolymer-Route eine Möglichkeit zur Verfügung stehen, im regulären Herstellungsprozess anfallende Reststoffe/Trocken- und Keramik-Bruch zu verwerten und dabei gleichzeitig thermisch aktivierte Stoffe zu

recyclen. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass die Geopolymerisation bereits bei sehr niedrigen Temperaturen, nämlich von Raumtemperatur bis ca. 80 °C stattfindet. Es wird somit kein keramischer Brand benötigt, wodurch künftig über 80 % der für den üblichen keramischen Herstellungsprozess benötigten Primärenergie eingespart werden sollen. Geopolymere lassen sich durch verschiedene Eigenschaften charakterisieren. Im Allgemeinen zeigen diese ein schnelles Abbindeverhalten, welches mit klassischen Bindebaustoffen vergleichbar ist. Hierbei kann während des Abbindeprozesses eine Temperierung auf 40 bis 60 °C eine beschleunigte Aushärtung bewirken. Geopolymere weisen eine hohe Endfestigkeit auf, welche mit Zement-/Beton-Systemen vergleichbar sind. Die erreichten Festigkeiten können zusätzlich durch eine Temperierung gesteigert werden. Zudem sind die meisten Geopolymere temperaturbeständig bis circa 1200 °C und nicht brennbar.

In der hier beschriebenen Machbarkeitsstudie wurden aus acht verschiedenen Einsatzstoffen Geopolymer-Nullproben (bestehend aus 100 % Rohstoff, ohne Mischung der einzelnen Komponenten) hergestellt. In Abbildung 4 sind die im Versuch ausgehärteten Geopolymer-Proben aus jeweils 100 % sortenreinem Einsatzstoff dargestellt.

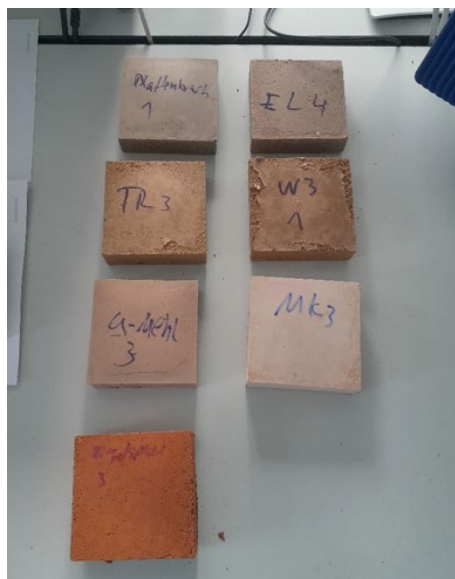


Abbildung 4: Ausgehärtete Geopolymer-Nullproben aus verschiedenen Baureststoffen, u.a. Gesteinsmehl, Schamottebruch, Metakaolin und Ziegelbruch.

Alle Proben in Abbildung 4 bestehen jeweils zu 100 % aus einem einzigen Ausgangsmaterial, ohne Vermischung der Einsatzstoffe. Zur Optimierung der technischen Parameter und des Abbindeverhaltens werden derzeit weitere Versuche durchgeführt. Ziel ist die Entwicklung von Geopolymer-Mischungen, welche nach ihrer Aushärtung den werkstofftechnischen Eigenschaften von Hafner-Schamotte-Produkten möglichst nahekommen und auch deren Zulassungs-Anforderungen erfüllen. Die bisher erzielten Ergebnisse sind sehr vielversprechend und stellen für künftige Anwendungen eine kalterhärtende, energiesparende Herstellungsvariante unter Verwendung von Sekundärrohstoffen dar.

1.4 „Entwicklung einer Wärmedämmbeschichtung für hochwärmedämmende Wandbaustoffe“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. K. Zeyer, M. ng. J.-S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar

Ziel der vorgestellten Arbeiten waren die Weiterentwicklung und Anwendung einer neuartigen Wärmedämm-Beschichtung auf Ziegelkeramik. Dabei wurden industriell gefertigte Großziegel im Technikums-Maßstab mit der Beschichtung ausgerüstet. Im weiteren Verlauf wurden die Emissionskoeffizienten ϵ der unbeschichteten und beschichteten Ziegeloberflächen ermittelt und die jeweiligen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der so ausgerüsteten Ziegel im Wärmeprüfstand gemessen. Abbildung 5 (Links und Mitte) zeigt die verwendete Beschichtungsanlage mit eingelegtem Hochlochziegel. Abbildung 5 (Rechts) zeigt den Blick in einen aufgeschnittenen beschichteten Hochlochziegel. Es werden nur die inneren Oberflächen im Lochmuster der Hochlochziegel beschichtet. Die Außenflächen bleiben unbeschichtet.



Abbildung 5: Beschichtungsanlage mit eingelegtem Hochlochziegel (Links und Mitte); aufgeschnittener, im inneren Lochbild beschichteter Hochlochziegel (Rechts).

Die unbeschichteten Ziegeloberflächen haben Emissionskoeffizienten zwischen $\epsilon = 0,94$ bis $0,96$. Nach Applikation der Beschichtung resultieren Emissionskoeffizienten je nach Qualität der Applikation zwischen $\epsilon = 0,19$ bis $0,36$. Damit gelingt die Absenkung der Emissionskoeffizienten um bis zu $80,21\%$ und eine entsprechende Absenkung des Strahlungsanteils am Wärmeübergang. Durch den Effekt wird eine Minderung der äquivalenten Ziegel-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äq}}$ und damit Verbesserung der Wärmedämmung um bis zu 30% erzielt.

1.5 Entwicklung und Erprobung eines innovativen hochporösen mineral-organischen Akustikschaum-Systems mit optimierter Wärme- und Schalldämmung und verbessertem Brandverhalten zur Nutzung für mobile Stellwände und als Innendämmung von Wänden; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. D. Sappa, Dipl.-Phys. Gunnar Harhausen, Prof. Dr. A. Dentel und Prof. Dr. W. Krcmar

Moderne funktionale Schallschutz-Elemente für Innenräume sorgen durch ihre hohe Schallabsorption für ein erhöhtes Wohlbefinden der Nutzer. Außerdem sollen sich die Bauelemente durch verbesserte Brandschutzeigenschaften auszeichnen und im optimalen Fall sogar unbrennbar sein. Im Rahmen des Vorhabens werden den Einsatzstoffen bei der Gips-schaum-Herstellung $2,5\text{ Gew.}\%$ bzw. $10\text{ Gew.}\%$ pulverförmige und faserförmige Füllstoffe aus unterschiedlichen Werkstoffklassen zugemischt, wodurch eine zielgenaue Einstellung der Performance ermöglicht wird. Die besten Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Füllstoff-Zugabe der bewertete Schallabsorptionsgrad um bis zu 75% und die Wärmeleitfähigkeit um 27% erhöht (Abbildung 6).

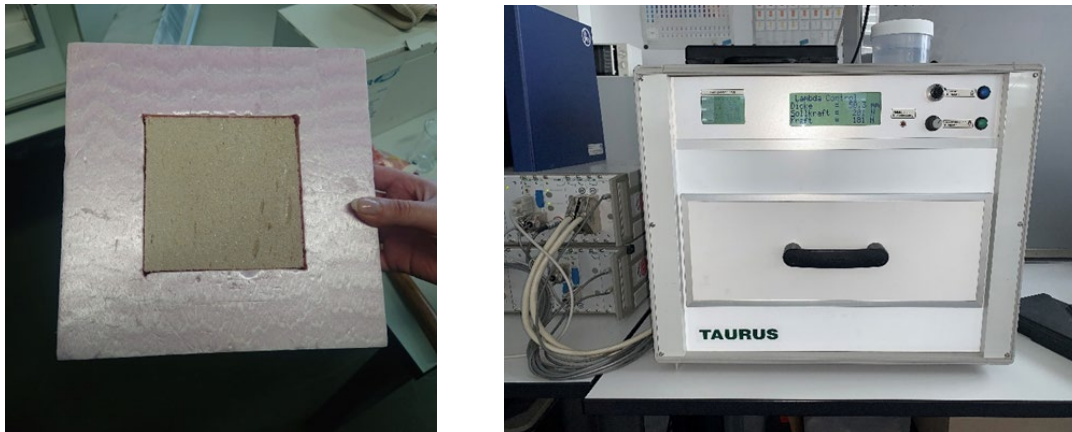


Abbildung 6: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit modifizierter Gipsschäume mittels Einplatten-Messgerät der Firma Taurus TLP 200.

1.6 Ziegel 2022 – Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. D. Sappa, M.Eng. K. Oeder und Prof. Dr. W. Krcmar

Das Forschungsvorhaben „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Methode und Rapid Prototyping“ startete am 01.09.2017 und wurde am 31.03.2022 beendet (PTJ-FKZ 03ET1526 A). Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die wärme- und schallschutztechnische Weiterentwicklung klassischer- sowie die Entwicklung völlig neuartiger Ziegelgeometrien. Zur Verbesserung der Schall-Absorption wurde im Rahmen des Vorhabens die sogenannte „Schallstopper-Technologie“ entwickelt, die auf jede beliebige Ziegel- bzw. Mauerstein-Geometrie anwendbar ist und sich durch eine Erhöhung der Schallschutzeigenschaften bei gleichbleibender Wärmedämmung sowie gleichbleibender bzw. leicht erhöhter Druckfestigkeit der Ziegel auszeichnet. Für die Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften erfolgte die Applikation einer Infrarot-Reflexbeschichtung. Dabei gelingt eine Absenkung des Strahlungsanteils an der Wärmeübertragung um bis zu 79 %. Dies führt zu einer Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und damit Verbesserung der Wärmedämmung um bis zu 30 %. Nachdem die Ziegel mittels CAD-Programm gezeichnet wurden (Abbildung 7 Links), erfolgt ein 3D-Druck der Ersatz-Ziegel aus Polymilchsäure (Abbildung 7 Rechts).

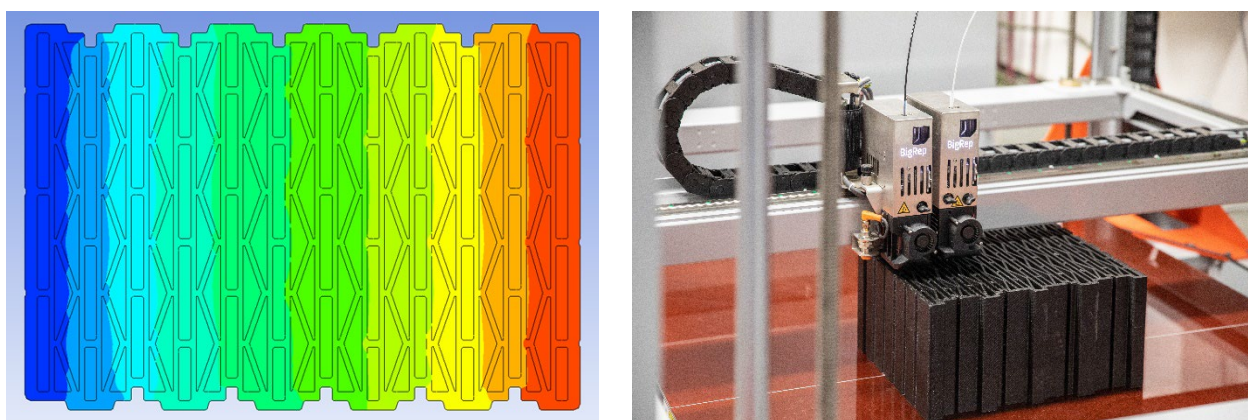


Abbildung 7: Wärmetechnische Finite Elemente Berechnung eines hochwärmedämmenden Mauerziegels mit HV-Lochung in Steinbreite 36,5 cm (Links); 3D-Druck des Ersatzziegels mit HV-Lochung aus Polymilchsäure. Die so hergestellten Kunststoff-Ersatzziegel werden im Wärmeprüfstand auf ihre äquivalente Wärmeleitfähigkeit geprüft und die erzielten Ergebnisse werden auf einen entsprechenden keramischen Ziegel umgerechnet.

Das Formgebungswerkzeug zur Herstellung eines keramischen Ziegels, das sogenannte Mundstück, ist jeweils am Extruderkopf montiert und enthält eine Vielzahl an hartverchromten Kernen, zwischen denen die Tonmischung im Endlosstrang extrudiert wird. Dabei stellt die Geometrie der Kerneinsätze sozusagen das Negativ des späteren Ziegels dar, zuzüglich der Trocken- und Brennschwindung. Es besteht die Möglichkeit, die metallischen Kerneinsätze ebenfalls über ein Rapid Prototyping-Verfahren, nämlich dem sogenannten Laser-Cusing-Verfahren, herzustellen. Auf diese Art und Weise kann die aufwendige Herstellung eines Mundstücks für die Durchführung von Versuchsproduktion im Ziegelwerk umgangen werden, so dass künftige Forschungsarbeiten mit kürzeren Zeitschienen und geringeren Kosten erfolgen können.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erfolgte u.a. die Entwicklung eines neuartigen Zonen-Ziegels, der sich sowohl durch eine besonders hochwärmedämmende Zone, als auch durch zwei Zonen mit verbessertem Schallschutz auszeichnet. Der neuartige Zonen-Ziegel, dessen Lochbildgeometrie derzeit aus Geheimhaltungsgründen nicht gezeigt werden kann, wurde im Rahmen des Vorhabens in Versuchsproduktionen im Ziegelwerk hergestellt und im Wärme- sowie Schallschutz-Prüfstand untersucht. Die Abbildung 8 zeigt den schrittweisen Aufbau einer Schallschutz-Prüfwand zur Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maß R_w . Je nach Ausmaß des Schallstopper-Effekts gelingt eine Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maß R_w zwischen 1,2 bis 2,5 [dB].



Abbildung 8: Aufmauerung einer Versuchswand aus neu entwickelten Zonen-Ziegeln in den Schallschutz-Prüfstand und Applikation von Innen- und Außenputz. Nach einer Aushärtezeit von 10 Tagen erfolgte die Messung der Schallabsorption.

1.7 Einfluss der Porenform auf die Thermoschock-Eigenschaften von Cordierit-Keramik; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. J.-S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar

Für die thermische Isolierung von Hochtemperatur-Prozessen werden feuerfeste Isoliersteine aus hochtemperaturbeständiger Cordierit-Keramik benötigt. Damit die in Ofenanlagen eingebauten Cordierit-Steine so lange wie möglich genutzt werden können, müssen sich diese durch eine ganze Reihe optimaler werkstofftechnischer Kenngrößen empfehlen, u.a. durch eine sehr gute Thermoschock-Beständigkeit. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit besteht das Ziel darin, zu untersuchen, ob durch Variation der Porenform in der Cordierit-Keramik die Thermoschock-Eigenschaften optimiert werden können. Dafür wurden zu einer Cordierit-Tonmasse-Nullprobe vor der Extrusion zu Formkörpern jeweils 5, 10, 15 und 20 Vol.-% sphärische, quaderförmige und zylindrische Porosierungsmittel auf Polymerbasis in Monoporosierung zugesetzt. Nach dem Sinterprozess haben die Poren aus unterschiedlichen Porosierungsmitteln im Mittel ein Einzelporen-Volumen von $3,375 \text{ mm}^3 \pm 0,250 \text{ mm}^3$, so dass bei allen zu vergleichenden Proben die Porositäten und das Einzelporen-Volumen konstant bleiben, während die Porengeometrie variiert. Nach dem Brennen bei maximal 1330°C werden die fertigen keramischen Cordierit-Probekörper einer Thermoschock-Behandlung unterzogen. Dabei werden die gebrannten Probekörper jeweils auf die Temperaturen 350 , 450 , 550 , 650 und 750°C aufgeheizt und

anschließend in einem Wasserbad mit einer Temperatur von 20 °C abgeschreckt. Danach erfolgt die vergleichende Bestimmung werkstofftechnischer Kenngrößen, u.a. der 3-Punkt-Biegefestigkeit (Abbildung 9), entsprechend den zugehörigen Temperaturdifferenzen $\Delta T = 330, 430, 530, 630$ und 730 K. Die größte relative Reduzierung X der 3-Punkt-Biegefestigkeit im Vergleich zur unporierten Nullprobe wird mit sphärischen Poren bei $\Delta T = 330, 530, 630$ und 730 K und den Porosierungsmittel-Gehalten 5, 10, 15 und 20 Vol.-% mit $X = 126,2 \%, 80,7 \%, 69,2 \%$ und $65,8 \%$ erreicht. Aus der Untersuchung geht hervor, dass durch Porosierung mit kugelförmigen Poren eine Verbesserung der Thermoschock-Resistenz erreicht wird.

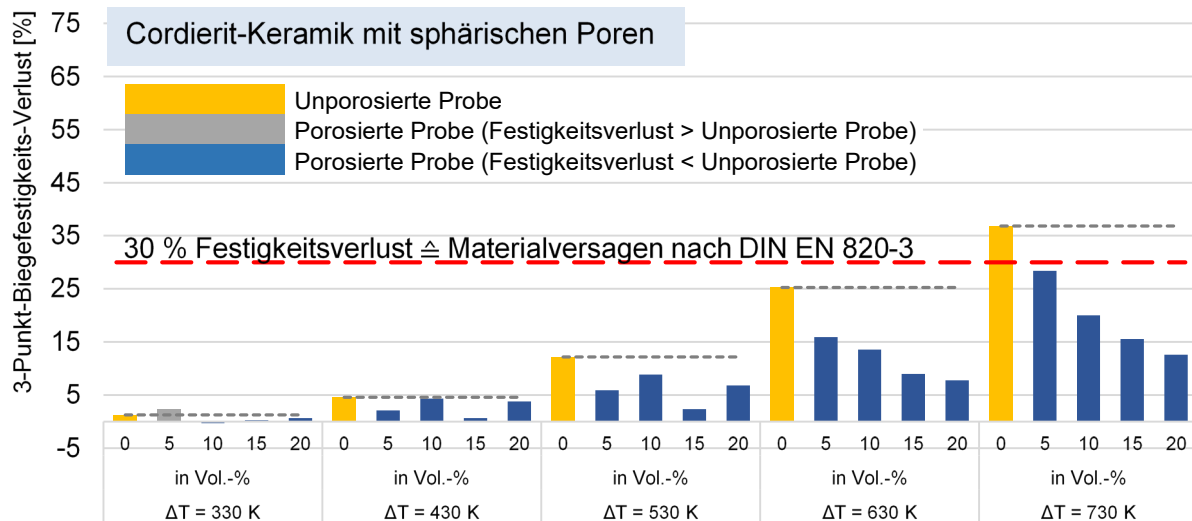


Abbildung 9: Prozentualer Verlust der 3-Punkt-Biegefestigkeit gegenüber den „ungeschockten“ Proben für die Temperaturdifferenzen $\Delta T = 330, 430, 530, 630$ und 730 K. Durch sphärische Poren wird bis auf eine Ausnahme ($\Delta T = 330$ K bei 5 Vol.-% Porosierungsmittel) stets eine Verbesserung der Thermoschock-Beständigkeit gegenüber der unporierten Probe erreicht.

1.8 EU-Projekt Horizon 2020 „LightCocce - Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures; Technische Hochschule Nürnberg; Fakultät Werkstoff-technik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. C. Allar, K. Oeder, M.Eng. J.-S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar



Das EU-Projekt „LightCocce“ (Projekt Nr. : 814632 – Horizon 2020) startete am 01.01.2019 mit einer Laufzeit von vier Jahren. Im Vorhaben sind insgesamt 26 Projektpartner aus neun EU-Ländern vereint. Ziel ist die Errichtung und Vermarktung einer europaweit vernetzten Forschungsinfrastruktur zur energieeffizienten Weiterentwicklung von Dämm- und Leichtbau-Werkstoffen. Dafür wurde im Technikum des Energie Campus Nürnberg eine Pilotanlage zur Herstellung von Laborziegeln aufgebaut, mit der alle verfahrenstechnischen Schritte der Ziegelherstellung von der Rohstoffmischung, Aufbereitung, Formgebung, Trocknung und Brennprozess im Technikumsmaßstab abgebildet werden. Darüber hinaus

können die wesentlichen werkstofftechnischen Ziegeleigenschaften geprüft sowie analytische Untersuchungen an den Produkten erfolgen.



Abbildung 10: Nanoporosierung einer Tonmischung mit „Carbon Black“ für die Herstellung höchstwärmedämmender Ziegel (von Links nach Rechts); Eirich-Mischer, Laborextruder, Trockenschrank, Proben im Ofen vor dem Brand und Proben im Ofen nach dem Brand.

Im Berichtszeitraum bestand die Aufgabe darin, durch eine Nanoporosierung mit „Carbon Black“ (Abbildung 10) die Scherben-Wärmeleitfähigkeit auf einen Wert von mindestens $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/(mK)}$ abzusenken, ohne gleichzeitig die Druckfestigkeit bedeutend zu mindern. Aus Abbildung 11 ist ersichtlich, dass bei einer Dosierung von 10 Gew.-% Carbon Black zur Tonmischung die Scherben-Wärmeleitfähigkeit der gebrannten Ziegelkeramik sogar auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,234 \text{ W/(mK)}$ abgesenkt werden konnte.

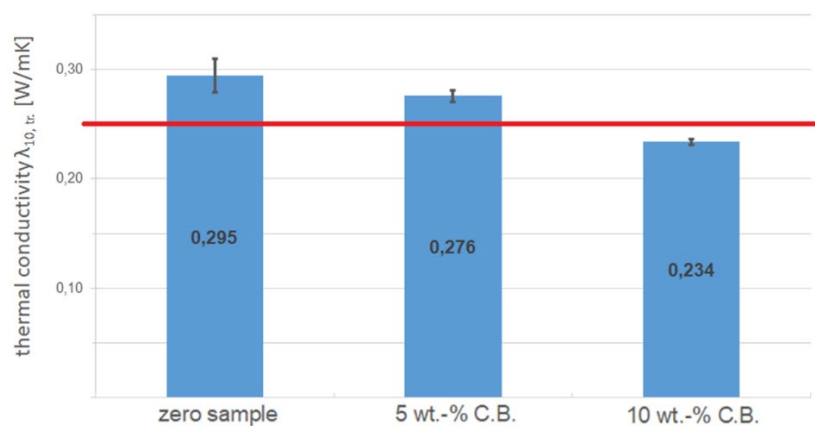


Abbildung 11: Durch Zugabe von 10 Gew.-% Carbon Black zum Ziegelton gelang die Absenkung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit unter die Zielgröße $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/(mK)}$.

1.9 EU-Projekt „Life-Hypobrick: Towards hypocarbonic economy – Development of non-fired building materials based on wastes“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; M.Eng. F. Kugler und Prof. Dr. W. Krcmar



Life
Hypobrick



Im laufenden EU-Projekt (LIFE18 CCM/ES/001114) werden im Labor- und Produktions-Maßstab kalterhärtende Geopolymere u.a. aus Flugasche, Ziegelmehl und Betonbauschutt sowie einer alkalischen Aktivator-Lösung hergestellt (Abbildung 12). Das Ziel der Untersuchungen besteht einerseits darin, zu prüfen, ob sich Ziegelmehl und gemahlener

Betonbauschutt grundsätzlich als Matrixmaterialien für die Geopolymerisation eignen und welchen Einfluss steigende Reststoff-Zugaben auf die Abbindereaktion, die gebildeten Strukturen und die damit verbundenen werkstofftechnischen Eigenschaften der Geopolymere ausüben. Alle hier untersuchten Geopolymer-Chargen unterschiedlicher Zusammensetzung zeigen für den Einsatz in der Bauindustrie geeignete Druckfestigkeiten; auch die aus reinem Ziegelmehl und reinem Betonbauschutt hergestellten Chargen. Außerdem wurde festgestellt, dass die sich ausbildenden Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten von den im Geopolymer gebildeten Phasen abhängig sind und sich je nach Zusammensetzung unterschiedlich ausbilden. Mit Blick auf die erzielten Ergebnisse ist eine eigenschaftsorientierte Baustoffentwicklung auf Basis von Flugasche-Ziegelmehl-Betonbauschutt-Geopolymeren mit verbesserten Eigenschaften gegenüber herkömmlichen klassischen Baustoffen möglich. Aus der Untersuchung geht weiter hervor, dass Geopolymere auch ohne die Zugabe von Flugasche hergestellt werden können. Damit besteht die Möglichkeit, die Geopolymer-Technologie zukünftig in einem auf Kohlestrom verzichtenden Wirtschaftsraum zu nutzen. Diese Entwicklung weiter voranzutreiben und großtechnisch einzusetzen ist sowohl im Hinblick auf eine künftig decarbonisierte Bauindustrie, als auch hinsichtlich konkurrenzfähiger Werkstoffeigenschaften von Geopolymer-Produkten gegenüber klassischen Baustoffen sinnvoll.



Abbildung 12: Eine Auswahl verschiedener, durch Gießformgebung und Extrusion hergestellter Geopolymer-Proben. Sowohl hochwärmedämmende Geopolymer-Schäume, als auch hochfeste Geopolymere und Hohlwaren können aus Baureststoffen kalterhärtend hergestellt werden.

1.10 „Fassade3 – effizient – aktiv – modular: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad“; Technische Hochschule Nürnberg, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Günter Kießling, M.Sc. Susanna Bordin und M.A. Marcel Neberich

Das in der zweiten Förderphase des EnCN beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) erfolgreich beantragte Forschungsprojekt „Fassade³ – effizient – aktiv – modular“ konnte im Jahr 2022 mit dem Bau einer Demonstrationsfassade abgeschlossen werden. Innerhalb eines interdisziplinären Verbunds aus Technischer Hochschule Nürnberg, dem ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. und weiterer Partner aus Forschung und Mittelstand wurde unter Koordinierung der Hochschule ein multifunktionales Fassadenelement entwickelt.

Im Jahr 2022 wurde schließlich eine Demonstrationsfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude in Kitzingen umgesetzt (Abbildung 13) und das elektrische und thermische Monitoring der Fassade in Betrieb genommen. Insgesamt wurden 18 Fassadenelemente an der Südfassade des Gebäudes über zwei Stockwerke und je drei Wohneinheiten montiert. Die Idee hinter multifunktionalen Fassadenelementen ist, dass die Gebäudehülle neben dem Schutz vor Wärme

und Feuchtigkeit weitere Funktionen übernehmen kann. In die Fassadenelemente sind organische Photovoltaik (OPV) sowie, je nach Position, ein regelbarer, selektiv beschichteter Sonnenschutz integriert. Als Grundgerüst dient ein Standardfassadensystem. Um die Anwendung der OPV an der Fassade zu ermöglichen, wurden die OPV-Module zum einen als horizontaler Sonnenschutz zwischen Verbundglasscheiben in die Fassade integriert und zum anderen in einen Aufbau mit Polycarbonat-Fassadenplatten. Mittels der OPV wird die Gebäudehülle aktiviert und trägt so zu einer regenerativen Stromerzeugung bei. Besonders im mehrgeschossigen Wohnungsbau ist dies ein wichtiger Aspekt, da die Dachflächen begrenzt sind und nur die Fassaden als zusätzlich nutzbare Flächen für weitere Photovoltaik-Module zur Verfügung stehen.



Abbildung 13: Demonstrationsfassade mit integrierter organischer Photovoltaik.

1.11 KMU^{plus} - Energy Intelligence: Entwicklung einer modularen Energiemanagement-Lösung für kleine und mittlere Unternehmen als Mehrwert im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation; Technische Hochschule Nürnberg, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Wolfram Stephan, M.Sc. Kutralingam Kandasamy, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH). Gottfried Hilburger, M.Eng. Johannes Hellmuth und B.Eng. Cornelius Eichfeld

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer modularen und damit kostengünstigen Energiemanagementlösung für kleine und mittlere Unternehmen als Grundvoraussetzung im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation. Alle Ebenen des Energiemanagements - von der Datenerfassung, über die -Verarbeitung bis hin zur Bedien- und Beobachtungsebene - sollen innerhalb des Vorhabens auf den Bedarf kleiner und mittlerer Unternehmen angepasst und an Hand eines Praxisbeispiels die erfolgreiche Durchführbarkeit demonstriert werden. Mit Hilfe dieses Vorhabens soll kleineren Unternehmen die Möglichkeit gegeben werden, die vorhandenen Logistik-, Produktions- und Energiedaten sinnvoll in einem System zu vernetzen, umfassend zu bewerten und die notwendigen Schritte zur Erschließung von Energiesparmaßnahmen selbst einzuleiten. Die zu entwickelnde Energy Intelligence Lösung wird das Unternehmen bei der Umsetzung eines Energiemanagement-Systems nach ISO 50001 unterstützen und zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess anleiten.

1.12 Lüftungsstrategien mit raumlufttechnischen Anlagen zur Reduzierung des Risikos der Übertragung aerosolgebundener Infektionskrankheiten für Bildungseinrichtungen bei einer möglichst energieeffizienten Betriebsweise; *Technische Hochschule Nürnberg, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Wolfram Stephan, M.Sc. Susanna Bordin und M.Eng. Sebastian Hummel*

Das interdisziplinäre Forschungsvorhaben der TH Nürnberg und des Lüftungsgeräte-Herstellers Wolf startete im September 2022. Es wird im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) über eine Laufzeit von zwei Jahren gefördert. Im Projektfokus steht die Frage, wie mit Hilfe von geeigneten Lüftungskonzepten für Räume in Bildungseinrichtungen, insbesondere Klassenräume, die Anforderungen an eine gute und gesunde Raumlufte eingehalten und ein gleichzeitig möglichst energieeffizienter Betrieb von maschinellen Lüftungsanlagen erreicht werden können. Zur Untersuchung werden sowohl simulative, als auch experimentelle Studien im Labor durchgeführt. Zusätzlich ist geplant, im Rahmen einer Feldstudie Klassenräume mit zentraler und dezentraler sowie ohne Lüftungstechnik zu vergleichen und Probandenbefragungen zu Erkrankungen der oberen Atemwege, Wohlbefinden und Raumkomfort durchzuführen. Insbesondere bei der Durchführung der Feldstudie wird das Forschungsvorhaben durch die Expertise der Paracelsus Medizinischen Universität Salzburg unterstützt. Das Projektziel besteht darin, auf Basis der Erkenntnisse aus Simulation, Experiment und Feldstudie Szenarien für die Auswahl und Betriebsweise von Lüftungsgeräten zu bewerten und in einem Leitfaden zusammenzufassen. In den ersten Projektmonaten konnte ein Büroraum am EnCN zur Untersuchung verschiedener Lüftungskonzepte umgestaltet werden (Abbildung 14).



Abbildung 14: Umgestalteter Büroraum am Energie Campus Nürnberg zur Untersuchung verschiedener Lüftungskonzepte.

1.13 Demonstration einer Mustersanierung mit smarter Energiesystemregelung für kosteneffizienten und klimaneutralen mehrgeschossigen Wohnungsbau; Teilvorhaben: Entwicklung eines Energiesystems mit smarter Systemregelung zum wirtschaftlichen und effizienten Anlagenbetrieb; Technische Hochschule Nürnberg, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. Arno Dentel, M.Eng. Christina Betzold und M.Eng. Sebastian Hummel

Das Projekt 'sEnSys' umfasst die Entwicklung und Umsetzung eines umfassenden Konzepts für energieeffiziente, wirtschaftliche und netzdienliche Gebäude, welche in der Jahresbilanz eine Energie- bzw. Klimaneutralität erreichen. Ziel des Projektes ist die Demonstration einer Sanierung im Bestand mehrgeschossiger Mehrfamilienhäuser, im Bereich des genossenschaftlichen Wohnungsbaus. Die Schwerpunkte des Projektes umfassen technische und wirtschaftliche Aspekte sowie Nutzerakzeptanz der Bestandsanierung. Der technische Schwerpunkt des Konzepts liegt auf einer energieeffizienten, smarten Gebäudetechnik sowie der bilanziellen energetischen Deckung (Niedrigstenergiegebäude) durch regenerative Energien bei optimierter Photovoltaik (PV)-Direktverbrauchsnutzung. Zur Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebs werden Betreibermodelle für Strom- und Wärmekonzepte untersucht und umgesetzt. Die Mehrkosten für den Aufwand an Komponenten und Regelungsfunktionen sollen durch eine erhöhte Systemeffizienz und somit niedrigere Energieverbrauchskosten, dem Wegfall einer externen Verbrauchsabrechnung, sowie der vollen Ausschöpfung der Möglichkeiten des Mieterstroms kompensiert werden. Eine Akzeptanz der energetischen Sanierung kann nur erfolgen, indem die Bewohner vom wirtschaftlichen und technischen Zusammenspiel profitieren. Die Systemregelung beinhaltet daher ein gebäudeweites Energie- und Lastmanagement, das eine Nutzereinbindung umfasst. Durch ein Nutzerinterface sollen Messwerte visualisiert und Steuerungseingriffe durch Nutzer ermöglicht werden. Der Arbeitsschwerpunkt der THN liegt auf der Entwicklung des Energie- und Gebäudetechnik-Konzeptes, insbesondere auf der Entwicklung und Testung von Betriebsführungsstrategien sowie Monitoring und Betriebsoptimierung.

1.14 Bayerischer Energiepreis für die Herzo Base – Energiespeicherhäuser; Technische Hochschule Nürnberg, Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. A. Dentel, Prof. Dr. G. Kießling, M.Eng. C. Betzold, M.Eng. C. Dettelbacher, M.Eng. D. Sappa und Prof. Dr. W. Krcmar

Die EnCN-Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“ der TH Nürnberg und die RAAB Baugesellschaft mbH & Co.KG erhielten am 19.10.2022 für ihr Gemeinschaftsprojekt „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ den Bayerischen Energiepreis 2022 in der Kategorie „Gebäude als Energiesystem / Gebäudekonzept“. Energie- und Wirtschaftsminister Hubert Aiwanger überreichte die renommierte Auszeichnung für besonders innovative Leistungen im verantwortungsvollen Umgang mit Energie in feierlichem Rahmen im Festsaal des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie in München. Von insgesamt 106 eingereichten Bewerbungen konnten sich nur sechs Bewerbungen in unterschiedlichen Kategorien durchsetzen. Die Herzo Base - Energiespeicherhäuser waren mit dabei! Die 8 Plusenergie-Reihenhäuser sind ein hochkarätiges Demonstrationsobjekt für nachhaltiges Bauen und ein Real-Beitrag zur Energiewende (Abbildung 15). Das gestufte Vorhaben mit Planung, Erstellung und Kurzzeit-Monitoring (PTJ-FKZ 03ET1364A) sowie einem nachgeschalteten Langzeit-Monitoring (PTJ-FKZ 03ET1641 A) wurde freundlicherweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Im Gebäudekomplex kommen hochwärmedämmende, innovative Baustoffe, Geothermie und Photovoltaik, elektrische und thermische Speicher sowie eine intelligente modellprädiktive Regelungstechnik zum Einsatz. Die mehrjährige wissenschaftliche Begleitung mit energetischem Monitoring führte zu weiteren Optimierungen der Gebäude. Bayerns Wirtschafts- und Energieminister Hubert Aiwanger lobte im Rahmen der Preis-Verleihung Pioniergeist und Engagement der Preisträger: „In Zeiten, in denen Energieeffizienz und regenerative Energieerzeugung höchste Priorität haben, sind wir angewiesen auf innovative Best-Practice-Lösungen für eine nachhaltige Energiezukunft. Dies zeigen die Preisträger in vorbildlicher Weise“. Den energieeffizienten Ansatz des Herzo Base-Projekts entwickelte die EnCN-Arbeitsgruppe zusammen mit dem Arbeitskreis Energie der Agenda 21 in Herzogenaurach. Die Erstellung der 8 Energieplus Häuser erfolgte durch die Baufirma Raab mbH & Co.KG, Ebensfeld in Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro Bär / Kühhorn, Nürnberg. Bei der Errichtung des

Gebäudekomplexes wurden ausschließlich wohngesunde und hochwertige Baustoffe eingesetzt sowie auf ein optimales Zusammenwirken aller Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung geachtet. Die Wände der Reihenhäuser wurden aus hochwärmedämmenden Ziegeln erstellt. Dafür wurden die verwendeten POROTON-Ziegel in ihren inneren Hohlräumen mit dem Hochleistungsdämmstoff CALOSTAT der Firma Evonik ausgerüstet. Dieser zeichnet sich durch eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit von nur $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,019 \text{ W/(mK)}$ aus. Dadurch konnten extrem niedrige U-Werte der Gebäudehüllen von nur $0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ realisiert werden. Das innovative Energiekonzept der Herzo Base-Häuser beinhaltet zudem eine Systemintegration aus regenerativer Energieerzeugung und Speicherung, darunter eine Photovoltaikanlage, Geothermie mit 2 Sole/Wasser-Wärmepumpen sowie thermische und elektrische Speicher. Eine passive Kühlung zur Raumtemperierung wurde ebenfalls integriert.



Abbildung 15: Die Herzo Base-Energiespeicherhäuser erhielten den „Bayerischen Energiepreis 2022“ in der Kategorie „Gebäude als Energiesystem / Gebäudekonzept“.

Der Betrieb der zentralen Speichertechnologien wird im energetischen Gebäudeverbund genutzt; ermöglicht durch eine gemeinsame Energiezentrale aller 8 Häuser. Eine vorausschauende Regelungstechnik, mit Einbeziehung von Wetterdaten und -prognosen sowie eigens entwickelter Software, ermöglichen einen sinnvollen, digital gesteuerten und optimierten Energieeinsatz. Um die Gebäude über mehrere Jahre hinweg energetisch bewerten zu können, wurden in den Gebäudehüllen und an energetischen Schlüsselstellen Sensoren verbaut, die Messungen physikalischer Kenngrößen im bewohnten Zustand ermöglichen. Die angestrebten energetischen Werte eines Plusenergiehauses (Energiestandard KfW 40 Plus) werden nicht nur erreicht, sondern zum Teil übertroffen. Der Wohnkomplex ist in der Jahresbilanz autark und speist im Jahresverlauf mehr Strom in's Netz ein, als er daraus bezieht. Das Projekt zeigt die Wichtigkeit des Zusammenspiels aus passiver Wärmedämmung und aktiver Systemintegration der Technischen Gebäudeausrüstung. In keinem der 8 Energieplus-Häuser gibt es eine feuerungstechnische Anlage. Die Energiekosten lagen im Jahr 2021 bei durchschnittlich 375 Euro pro Haus mit je 155 m^2 Wohnfläche.



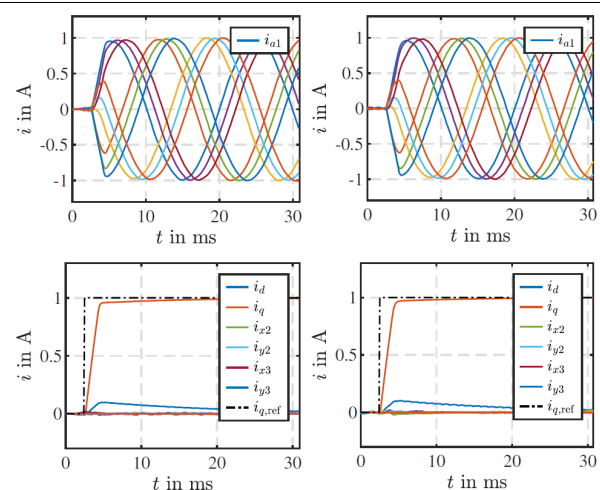
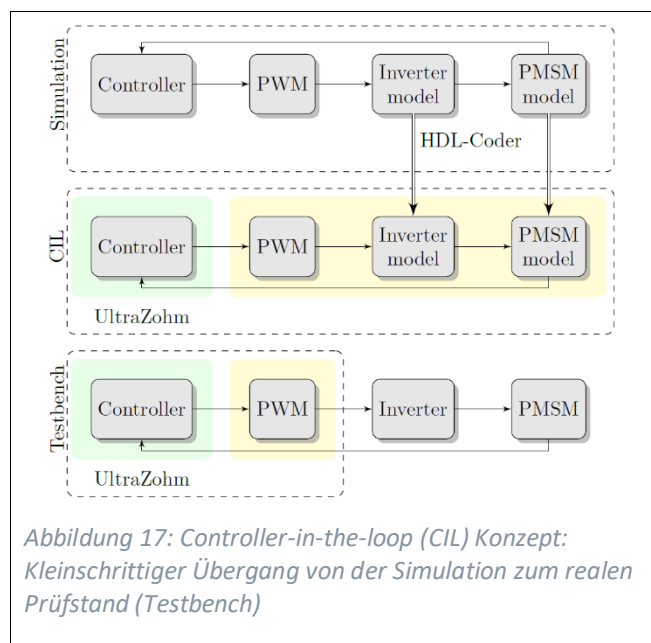
Abbildung 16: (Linkes Bild) Verleihung des „Bayerischen Energiepreis 2022“ im Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, an die Raab Baugesellschaft mbH & Co.KG und die TH Nürnberg (v.l.n.r.) Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel, Prof. Dr. Wolfgang Krcmar, Energie- und Wirtschaftsminister Hubert Aiwanger, Constance Köpke und Gisela Raab; (Rechtes Bild) Das Herzo Base-Team (v.l.n.r.) Julia Raab, Wolfgang Schoepe, Constance Köpke, Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel, Gisela Raab, Andreas Bär, Christiane Dettelbacher, Wolfgang Schubert-Raab und Prof. Dr. Wolfgang Krcmar. Bildquelle: Bayern Innovativ / Astrid Schmidhuber.

2 Energieeffiziente Industrie

2.1.1 Innovative energieeffiziente Antriebe; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät „Energietechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik“; Prof. Dr. Armin Dietz, Prof. Dr. Andreas Kremser, M.Sc. Michael Hoerner, M.Sc. Martin Regnet, M.Sc. Lukas Rabenstein, M.Sc. Tobias Schindler, M.Eng. Michael Schmidt und M.Sc. Timo Wilfling

Arbeiten und Ergebnisse

Im Forschungsfeld energieeffiziente Mehrphasenmaschinen wurden die Anstrengungen in Richtung energieeffiziente Regelung ausgeweitet. Um diese komplexen Antriebssysteme am Prüfstand untersuchen zu können, wurde als Zwischenschritt ein Controller-in-the-loop (CIL) Konzept erforscht (Abbildung 17). Ziel ist es, die Regelalgorithmik inklusive der Regelstrecke zunächst auf der Recheneinheit des Prüfstands vollständig zu implementieren und per Simulation „on-chip“ eine erste funktionale Validierung der Algorithmik durchzuführen. Die Methodik erlaubt kleinschrittig, nachprüfbar und gefahrlos den Übergang von der Simulation auf dem Rechner, hin zur Messung am realen System. Hierzu entstand eine Veröffentlichung [6], die am Beispiel einer 9-phasigen Synchronmaschine die erfolgreiche CIL-Implementierung zeigen konnte. Der Vergleich zwischen Simulation und CIL-Implementierung zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 18).



2.1.2 ProEMA: Prüfstand für elektrische Hochdrehzahlantriebe für Energie- und Mobilitätsanwendungen

Das Projekt ProEMA wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 1.051.202,14 € im Rahmen des Programms FHInvest 2020 gefördert (Förderkennzeichen 13FH066IN0). Es dient dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Hochdrehzahl-Prüfstandes an der TH Nürnberg und somit der Schärfung des Forschungsprofils. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der elektrischen Maschinen lassen den Trend erkennen, dass die bislang geltenden Drehzahlbereiche massiv nach oben erweitert werden. Nicht nur durch den Haupttreiber dieser Entwicklung, die Elektromobilität, wird dieser Trend forciert, sondern auch im industriellen Bereich werden zunehmend hohe Drehzahlbereiche bei der Anwendung elektrischer Antriebe sichtbar. Z.B. für die Kältetechnik mit hochdrehenden Kompressoren oder Hochdrehzahl-Generatoren im Bereich von thermodynamischen Prozessen zur Restwärmenutzung, wo Mikroturbinen zum Einsatz kommen. Die bisherigen Forschungsarbeiten zu elektrischen Antrieben konnten im Institut

ELSYS der Technischen Hochschule Nürnberg durch die aktuellen Prüfmöglichkeiten hervorragend durchgeführt und beendet werden, so dass sich die TH Nürnberg in den letzten Jahren zu einem attraktiven Forschungs- und Entwicklungspartner entwickeln konnte. Um diesen Zuspruch aus der Industrie weiterhin zu erhalten und um dem eigenen Anspruch an Forschung zu hochaktuellen Themen zu genügen, werden die Prüfmöglichkeiten systematisch ausgebaut und damit dem Trend zu hohen Antriebsdrehzahlen durch den entsprechenden Ausbau der Mess- und Prüftechnik Rechnung getragen. Damit kann die Zukunftsfähigkeit der Forschung an elektrischer Antriebstechnik an der TH Nürnberg nachhaltig sichergestellt werden und durch die Erweiterung der Forschungsmöglichkeiten aktiv gestaltet werden.

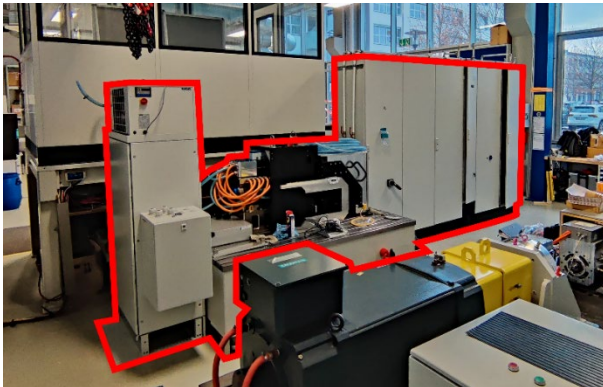


Abbildung 19: Neuer Hochdrehzahl-Prüfstand ProEMA integriert im Prüffeld für elektrische Antriebe der Technischen Hochschule Nürnberg.

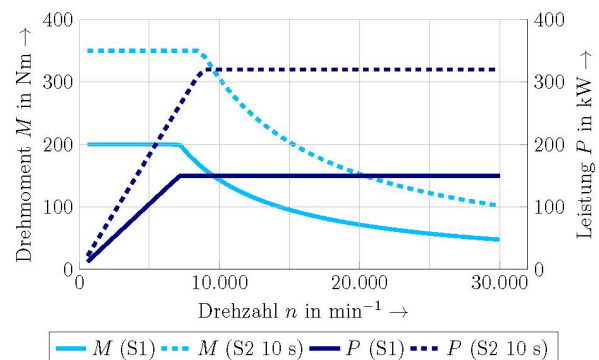


Abbildung 20: Drehmoment- und Leistungskennlinie des Hochdrehzahl-Prüfstands ProEMA.

Der im Rahmen des Projekts ProEMA entstandene Hochdrehzahl-Prüfstand (Abbildung 19) dient der Validierung von Forschungsergebnissen aus Mobilitäts- und Energieanwendungen. Mit ihm kann die elektromagnetische Auslegung von elektrischen Maschinen überprüft und damit auch verbessert werden. Besonders die Effekte, welche auf sehr hohe Regel- und Taktfrequenzen zurückzuführen sind und speziell bei hochdrehenden Maschinen auftreten, können mit dem neu entstandenen Prüfstand untersucht werden. Der Leistungsbereich (Abbildung 20), den der Hochdrehzahl-Prüfstand abdeckt, ist für aktuelle und zukünftige Entwicklungen im fokussierten Forschungsfeld ausreichend dimensioniert. Zusätzlich wird durch den Hochdrehzahl-Prüfstand die Kooperation mit Unternehmen im Rahmen von Auftragsforschung und Dienstleistungen ermöglicht und fördert somit neben den Verbundforschungsprojekten den Wissenstransfer in die Wirtschaft. Der Einsatz des Hochdrehzahl-Prüfstands ist bereits für mehrere Verbundforschungsprojekte geplant, zusätzlich sind bereits konkrete Anfragen zu Dienstleistungsaufträgen vorhanden. Hierdurch ist sowohl die Notwendigkeit des Prüfstandes als auch die Schärfung des Forschungsprofils der Technischen Hochschule Nürnberg zu erkennen.

2.1.3 SynchronBlow – Entwicklung eines innovativen Querstromfahrtwindgebläses mit einer Ausblasgeschwindigkeit von 180 km/h

Für Fahrsimulationen an KFZ-Prüfständen werden Fahrtwindgebläse eingesetzt, um den Einfluss von entstehendem Fahrtwind auf das Fahrzeug zu simulieren. Einsatzgebiete sind Abgasprüfungen, Rollenprüfstände oder Klimakammertests. Dabei ersetzt das Fahrtwindgebläse den fehlenden Fahrtwind bei Leistungsprüfständen und Fahrsimulationen. Der erzeugte Fahrtwind wird auf den Fahrzeugkühler und unter das Fahrzeug geleitet. Hierdurch wird der kühlende Effekt des Fahrtwindes auf die Motortemperatur der geprüften Fahrzeuge simuliert. Aktuelle Fahrtwindgebläse erreichen aufgrund beengter Platzverhältnisse und limitierter Auslassquerschnitte in den Fahrzeugprüfständen, nur eine simulierte Geschwindigkeit von maximal 160 km/h, wobei eine Simulation der Fahrtwindgeschwindigkeit von 180 km/h dringend benötigt wird, um hierdurch den Einfluss höherer Fahrgeschwindigkeiten auf das Fahrzeug und einzelne Komponenten simulieren zu können. Für den Antrieb des Querstromfahrtwindgebläses werden aktuell Asynchronmotoren verwendet. Zum Erreichen einer höheren Energieeffizienz wird im Projekt der Einsatz einer Synchronreluktanzmaschine favorisiert.

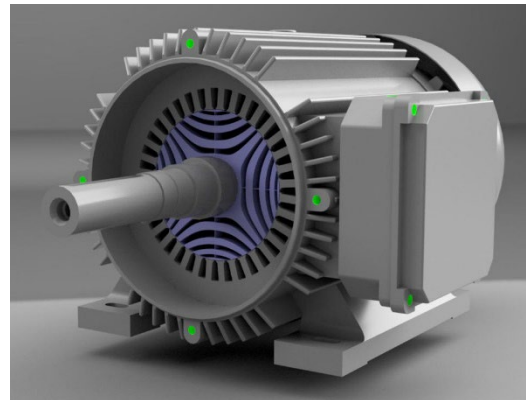


Abbildung 21: Synchronreluktanzmaschine

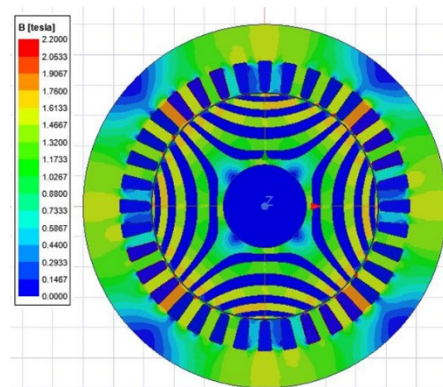


Abbildung 22: Magnetische Flussdichte im Maschinenschnitt

Hauptziel des Kooperationsprojektes SynchronBlow ist die Entwicklung eines Querstromfahrtwindgebläses mit einer Ausblasgeschwindigkeit von 180 km/h bei einer sehr kompakten Bauform durch den Einsatz eines innovativen und optimierten Synchronreluktanzmotors. Die Entwicklung des neuen Querstromfahrtwindgebläses übernimmt dabei der Projektpartner WMB. Für den Synchronreluktanzmotor werden ein optimierter Stator und Rotor sowie der Gesamtaufbau entwickelt, um die Drehzahl von 2300 rpm bei einer gleichzeitigen Steigerung des Wirkungsgrades zu erreichen. Die mechanische Auslegung, die fertigungstechnische Umsetzung sowie die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des Synchronreluktanzmotors obliegen dem Projektpartner BEN Buchele. An der Technischen Hochschule Nürnberg erfolgt die elektromagnetische Auslegung und Berechnung der Synchronreluktanzmaschine sowie eine Optimierung auf die geforderten Zielgrößen mit Hilfe des institutseigenen Berechnungsprogramms für elektrische Maschinen. Dabei erfolgt sowohl eine analytische Berechnung unter Verwendung von Reluktanznetzwerken, als auch der Einsatz von numerischer FEM zur gezielten Optimierung.

2.1.4 HighTorqCraft - Effiziente elektrische Flugmotoren mit hohem Drehmoment

Innerhalb der letzten Jahre ist der Bestand an privaten und kommerziellen Drohnen enorm angestiegen, was die Entwicklung und Erweiterung der Einsatzgebiete von elektrisierten Luftfahrzeugen antreibt. Damit steigen die technischen Anforderungen an deren Antriebsmotoren hinsichtlich Effizienz, Lautstärke und Drehmomentdichte. Aus diesem Grund beschäftigt sich das ZIM-Forschungsprojekt *HighTorqCraft* mit der Entwicklung eines langsam drehenden, effizienten und drehmomentstarken Außenläufermotors für (un)bemannte Luftfahrzeuge. Für die Akzeptanz von kommerziellen Drohnen in urbanen Gebieten ist die emittierte Lautstärke der Propellerantriebe von Bedeutung, die mit der Antriebsdrehzahl ansteigt. Deshalb ist als Ziel des Forschungsprojektes ein langsam drehender Antrieb mit einer Nenndrehzahl von weniger als $2000 \frac{1}{\text{min}}$ gefordert.

Als Ausgangssituation wird der Außenläufermotor Q-150 des Kooperationspartners Hacker Motor GmbH verwendet.

Zur Effizienzsteigerung wird die Implementierung einer kombinierten Wicklung untersucht, um Stromwärme- und Oberwellenverluste zu reduzieren. Oberwellen werden ebenfalls gezielt mithilfe von PoleShaping, also der Veränderung der Rotoroberflächenkontur, unterdrückt. Die Steigerung der Drehmomentdichte erfolgt unter der Betrachtung verschiedener Magnet-Anordnungen im Rotor, die im Gegensatz zu Motoren mit Oberflächenmagneten ein zusätzliches Reluktanzmoment ermöglichen. Dadurch kann die Drehmomentdichte gesteigert und die eingesetzte Magnetmasse reduziert werden. Zusätzlich wird das Kühlungssystem optimiert und die Verwendung von verschiedenen weichmagnetischen Werkstoffen und Fertigungseinflüssen untersucht, um den optimierten Antriebsmotor zu realisieren.

Zur Umsetzung dieser Ziele wird das institutseigene Motorberechnungsprogramm *MatMax* für Außenläufermotoren mit innenliegenden Magneten und kombinierten Wicklungen erweitert. Mit dem Einsatz von numerischen Optimierungsalgorithmen können die Performance, Effizienz und Drehmomentdichte verbessert werden. Projektpartner sind die Firma Hacker Brushless Motors und das THN Inhouse-Institut ELSYS.



Gefördert durch:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Abbildung 23: Außenläufermotor Q-150 der Firma Hacker Motor GmbH.

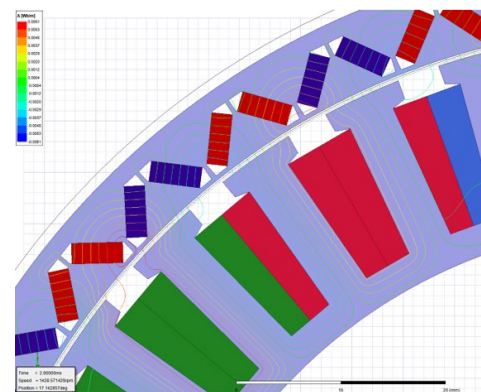


Abbildung 24: Außenläufermotor mit „vergrabenen“ Magneten.



2.1.5 KIRA - Validierung von künstlich intelligenten Regelverfahren für die elektrische Antriebstechnik

Ziel des Projekts KIRA ist die Verbesserung der technischen Eigenschaften der Regelung von elektrischen Antrieben durch die Nutzung von Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI). Hierbei soll die Schwingungsbelastung reduziert, die dynamischen Eigenschaften des Führungsverhaltens verbessert und der Aufwand der Parametrierung durch Experten und Expertinnen minimiert werden. Genutzt wurden insbesondere Methoden aus dem Bereich des Reinforcement Learnings. Kernkonzept ist die direkte Stromregelung mittels Deep Q-Learning (DQN). Der DQN Algorithmus stellt die Grundlage der hohen Forschungsaktivität zum Reinforcement Learning dar.

Die Berechnung von KI-basierten Regelverfahren in harter Echtzeit, d.h. deterministisch mit Berechnungszeiten im Bereich von 100 μ s bis 5 μ s, ist eine notwendige Bedingung für die Regelung von elektrischen Antrieben (Abbildung 25). Im Rahmen des Projekt KIRA konnte dies umgesetzt und validiert werden. Hierdurch steht eine echtzeitfähige Implementierung der KI-basierten Regelung zur Verfügung. Der Einsatz von gängigen Berechnungsplattformen, wie Mikroprozessoren und FPGA, ermöglicht die spätere Industrialisierung der Konzepte.

Die Leistungsfähigkeit der Regelung konnte teilweise validiert werden. Die avisierten Vorteile der KI-basierten Regelung gliedert sich in die Punkte Schwingungsbelastung, Gütekriterien und Parametrierung. Im Vergleich zur Projektplanung konnte die reduzierte Schwingungsbelastung nicht erreicht werden. Hauptproblem stellen die unterschiedlichen Zeitkonstanten zwischen mechanischen und elektrischen Systemen dar. Während der Projektplanung wurde angenommen, dass das gewählte KI Verfahren robust gegenüber dieser Systemeigenschaft ist. Um die Reduktion der Schwingungsbelastung dennoch umzusetzen, wurden Voruntersuchungen zu weiteren Reinforcement Learning Algorithmen durchgeführt und echtzeitfähig implementiert (Abbildung 26). Diese werden im Rahmen der wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit weiter untersucht. Im Bereich der Gütekriterien der Regelung von elektrischen Antrieben (u.a. Reglerdynamik, Überspringen) konnten wichtige Merkmale verbessert werden. Insbesondere im Bereich der Reglerparametrierung wurden die Vorteile validiert. Aufgrund der lernenden Eigenschaft der KI-basierten Regelung passt sich diese auf die jeweilige, zu regelnde elektrische Maschine automatisiert an. Nach erfolgreichem Training ist eine manuelle, durch Expertinnen und Experten durchgeführte Parametrierung nicht nötig. Hierdurch wird effektiv die Arbeitszeit von Experten und Expertinnen durch Rechenzeit ersetzt. Aus den genannten Projektergebnissen ergibt sich die Anschlussfähigkeit des Vorhabens sowie vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere die Parametrierung der Regelung am Prüfstand bei der Inbetriebnahme von neuartigen elektrischen Antrieben ist ein Kostenfaktor bei der Entwicklung. Diese Eigenschaft soll im Rahmen eines ZIM Verbundprojektes mit bayerischen KMU industrialisiert werden. Die Verbesserung der Gütekriterien sowie die Reduktion der Schwingungsbelastung wird im Rahmen eines vom BMWK geförderten Projekts zu autonomen Funktionen von Nutzfahrzeugen weiter erforscht. Das Projekt KIRA hat einen wesentlichen Beitrag für die Validierung von KI-basierter Regelung geleistet und die Etablierung von Forschung an dieser Schlüsseltechnologie an der TH Nürnberg ermöglicht. Somit konnte das übergeordnete Projektziel, die Validierung und Etablierung von KI-basierter Antriebsregelung, erreicht werden.

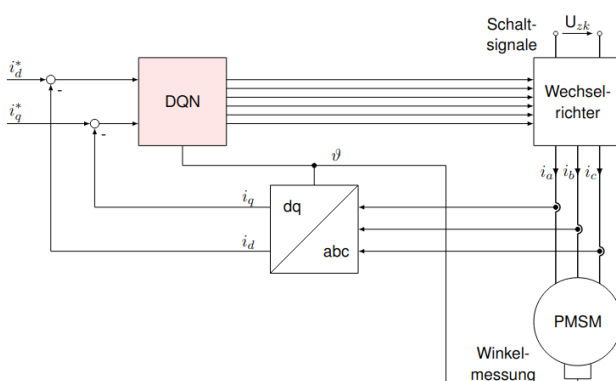


Abbildung 25: Regelungsstruktur für direkte Stromregelung eines Antriebs mit Deep Q-Learning (DQN).

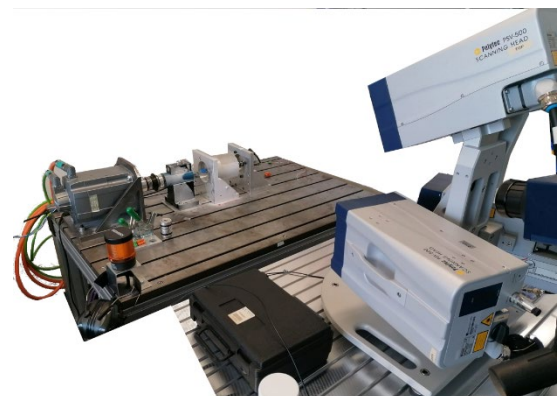


Abbildung 26: Messaufbau zur Erfassung des Schwingungsverhaltens elektrischer Maschinen mit 3D-Laser-Scanning-Vibrometrie.

2.1.6 CeraGo HiT – Energieoptimierte Galette mit keramischen Komponenten für die Verarbeitung von Hochleistungsgarnen

Im Herstellungs- und Verarbeitungsprozess technischer Fasern und Garne werden sogenannte Galetten als eine der wichtigsten Komponenten der Textilmaschine eingesetzt (Abbildung 27). Dabei handelt es sich um einseitig gelagerte, mit hoher Geschwindigkeit rotierende Zylinder, welche durch eine elektrische Maschine angetrieben werden. Die Galetten erfüllen verschiedene Fertigungsschritte wie z. B. die Streckung oder die Trocknung technischer Garne im Temperaturbereich bis 400 °C. Möglich ist dies durch eine mehrstufige induktive Wärmeerzeugung im Galetten-Mantel. Die induktiv übertragene Heizleistung im Galetten-Mantel führt funktionsbedingt auch zu einer nicht nutzbaren Wärmeerzeugung im Induktor, welche frühzeitige Ausfälle der Galette verursachen kann. Galetten sind einer Kombination von mechanischer, thermischer und chemischer Belastung ausgesetzt. Die Herstellung „neuer“ innovativer Hochleistungs-Fasern für Hochtemperaturanwendungen stellt auch erhöhte Anforderungen an Galetten in Bezug auf ihre Temperaturgleichmäßigkeit und Verschleiß-beständigkeit. Auch die Möglichkeit, höhere Maximaltemperaturen in Verbindung mit akzeptabler Materialstabilität auf dem Galettenmantel zu realisieren, bietet hohes Entwicklungspotenzial für zukünftige Generationen von Hochleistungs-Fasern, kann aber nach Stand der Technik heute noch nicht hinreichend akzeptabel bedient werden. Der Verschleiß an der Galettenmantel-Oberfläche sowie die starke thermische Belastung des Induktors und der Lagerung stellen die größten Defizite der heutigen Galetten-Technik dar. Die Lebensdauer der Galetten-Mäntel wird durch die Applizierung keramischer Schutzschichten erhöht. Allerdings ist die Applizierung solcher Beschichtungen mittels thermischer Spritzverfahren eine große Herausforderung und die erzeugten Beschichtungen weisen eine Restporosität auf.



Abbildung 27: Galetten mit beschichteten Galetten-Mänteln.

Im hier vorgestellten Projekt wird eine Technologie für die Herstellung von maßgeschneiderten Spritzpulvern auf Basis von Precursor-Keramiken und die dazu gehörigen Applizierungsverfahren durch die auf Keramiken und deren Verarbeitung spezialisierte Rauschert GmbH und den Lehrstuhl für keramische Werkstoffe CME der Universität Bayreuth erforscht und entwickelt. Durch die neuentwickelten Spritzpulver und daran angepasste Spritzverfahren soll die Herstellung von dichterem, korrosionsbeständigen Verschleißschutzschichten erfolgen. Zudem werden neuartige anorganische Versiegelungen entwickelt und erprobt, die in Kombination mit Spritzschichten oder als eigenständige Beschichtungen eine Verbesserung der Galetten-Komponenten ermöglichen sollen. Parallel hierzu werden im Projekt verschiedene weichmagnetische Werkstoffe erforscht und charakterisiert und mit diesen die Induktoren optimiert. Die DIENES GmbH liefert hierbei das notwendige Know-how der Galetten-Technik. Die Erhart GmbH entwickelt die notwendigen Fertigungsverfahren zur Verarbeitung der erforschten Werkstoffe und die Produktion von Prüfkörpern und Demonstratoren. Am Institut ELSYS werden weichmagnetische Werkstoffe zur Verwendung in Induktorkernen und Galetten-Mänteln erforscht und messtechnisch charakterisiert. Ein Forschungsfokus liegt hier auch in der Verwendung von Soft Magnetic Composites und weichmagnetischen Ferriten. Die Ergebnisse fließen in analytische und numerische Berechnungsmodelle ein. Damit wird eine Verringerung der Temperaturbelastung von kritischen Komponenten wie Induktorkern und Induktorwicklung angestrebt sowie eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz.

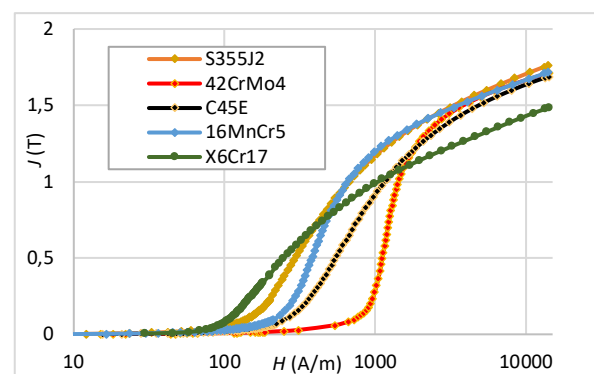


Abbildung 28: DC-Kommutierungskurven untersuchter Galetten-Mantel-Werkstoffe.

2.2 User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben; Hochschule Ansbach, Fakultät Technik; Prof. Dr. W. Schlüter, Prof. Dr. A. Buchele, M.Sc. J. Dettelbacher, M.Sc. K. Zacharias und M.Eng. N. Adamchuk

Einleitung und Motivation

An dem jährlichen Energieverbrauch von 503 Terrawattstunden im Jahr 2021 in Deutschland beträgt der Anteil der energieintensiven Gießereiindustrie mit sechs Terrawattstunden etwa 1,18 %. Dazu verbraucht die Gießereibranche in der Produktion vier Terrawattstunden. Diese Zahlen machen deutlich, warum Energieeffizienzmaßnahmen in der deutschen Gießerei-Industrie, als einem der größten Verbraucher fossiler Brennstoffe und elektrischer Energie, gerade in der aktuellen Energiekrise eine große Bedeutung haben. Die speziell in Deutschland sehr hohen Energie- und Personalkosten setzen die energieintensiven Gussunternehmen im globalisierten Markt unter einen enormen Kostendruck, um im globalen Markt unter den vorherrschenden schwierigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestehen zu können und die in den Wertschöpfungsketten am Anfang stehende Gussindustrie in Deutschland zu erhalten. Eine technologische Transformation hin zu einer digitalisierten energieeffizienten Produktion mit einer Energieversorgung durch regenerative Energieträger ist für die in den Wertschöpfungsketten am Anfang stehende Gussindustrie in Deutschland unerlässlich.

Die sehr langlebigen Produktionsanlagen in der Gießereibranche erschweren sowohl eine Erhöhung des Digitalisierungsgrades der oft veralteten Steuerungstechnik, als auch den Einsatz von neuen, auf regenerativen Energieträgern basierenden Prozesstechniken. Es gelingt einem Großteil der Unternehmen nicht, das Ziel einer stark digitalisierten energieeffizienten Produktion unter möglichst hoher Verwendung regenerativer Energieträger in der Unternehmensstrategie erfolgreich zu verankern. Als Lösung bieten sich Pilotprojekte zwischen Unternehmen und Forschungspartnern an, welche die Potentiale einer technologischen Entwicklung ohne erheblichen finanziellen Aufwand aufzeigen.

Im Projekt „User Interface Design von Energiedaten“ im Forschungsbereich EFFIZIENZ wird über verschiedene Digitalisierungsansätze die Branche bei den notwendigen Transformationsprozessen unterstützt. So wurde mit einem kooperierenden Gussbetrieb prototypisch eine Lösung entwickelt, die verschiedenen Nutzergruppen Energie- und Produktionskennzahlen auf mobilen Endgeräten in geeigneter Form zur Verfügung stellt und damit einen energieeffizienteren Betrieb bei hoher Produktionssicherheit ermöglicht. Durch umfangreiche Betriebssimulationen konnte die Wirksamkeit verschiedener intralogistischer Energieeffizienzmaßnahmen gezeigt werden. Weitere Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung von innovativen Konzepten zur Abwärmenutzung in den Gussbetrieben und die Konzeption einer durchgängigen numerischen Prozesskette für Großguss-Bauteile, wie sie beispielsweise bei Windkraftanlagen zum Einsatz kommen. Die erworbene Expertise in Simulation und regenerativer Energietechnik wird zudem für die Entwicklung von Techniken zur Steigerung der Effizienz von Windenergieanlagen genutzt.

2.2.1 Intralogistische Energieeffizienzmaßnahmen

Aufgrund der stark gestiegenen Energiepreise gewinnt die Energieeffizienz bei den energieintensiven Schmelz- und Gießbetrieben immer mehr an Bedeutung. Mit verschiedenen Gießereien und dem Bundesverband der deutschen Gießerei-Industrie (bdguss) wurde daher an der Hochschule Ansbach ein Demonstrator zur simulationsgestützten Analyse von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt, in dem ein beliebig konfigurierbarer Schmelz- und Druckgussbetrieb virtuell abgebildet werden kann. Durch die Kopplung eines Materials- und Energieflussmodells kann sowohl die Produktion als auch der dazu notwendige Energiebedarf analysiert und optimiert werden. Mit dem Simulationsmodell wurden folgende Maßnahmen identifiziert und simulativ untersucht:

- Verbesserte Beschickungsstrategie der Schmelzöfen: Die Optimierung der Beschickungsvorgänge zielt auf eine Steigerung der Energieeffizienz des Schmelzvorgangs ab.

- **Materialvorwärmung:** Durch die Nutzung der in den Schmelzofen-Abgasen enthaltenen Restwärme kann das feste Aluminium auf 300 °C erwärmt werden.
- **Verbesserte Belieferung der Druckgussmaschinen:** Durch die Erfassung und Analyse des Füllstands sämtlicher Maschinen, kann eine bedarfsgerechte Belieferung erfolgen, wodurch sich das Risiko eines Ausfalls von produzierenden Druckgussmaschinen durch Flüssigaluminium-Mangel deutlich reduzieren lässt.

Es wurde simulativ gezeigt, dass bei den betrachteten Gießereien durch die Maßnahmen der spezifische Energieverbrauch im Schmelzbetrieb [kWh/t] um bis zu 25 % sank, während die Gesamtanlageneffektivität (OEE) um bis zu 3 % gesteigert werden konnte. Darauf aufbauend wurde in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern ein Online-Demonstrator erstellt, der die Wirksamkeit der Energieeffizienzmaßnahmen für drei typische Betriebe verschiedener Größe aufzeigt (www.hs-ansbach.de/emelt).

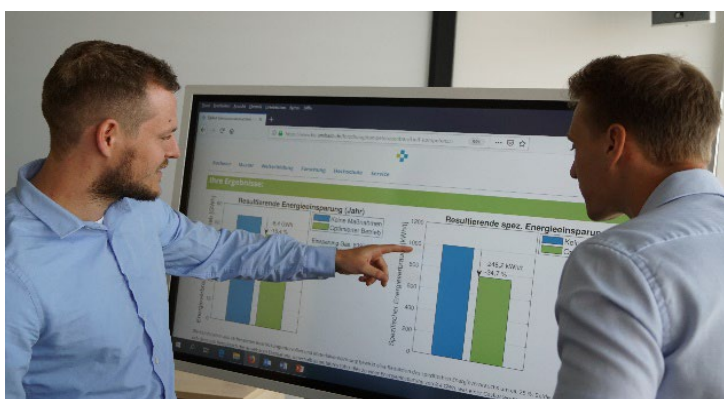


Abbildung 29: Energieeffizienzanalyse mit dem Demonstrator

Mit der entwickelten Material- und Energiefluss-Simulation wird in aktuell anlaufenden Arbeiten die Transformation von einem gasbetriebenen zu einem elektrifizierten Schmelzbetrieb mit den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Produktionsablauf untersucht und energetisch, ökonomisch und ökologisch analysiert. Dies ermöglicht im nächsten Schritt, ein am Strommarkt orientiertes flexibilisiertes Betriebsregime zu entwickeln. Ein weiteres Forschungsthema ist die simulative Untersuchung der Einbindung von regenerativen Energieträgern in die Energieversorgung und -nutzung von Gießereien. Dabei kommt insbesondere dem Energieträger Wasserstoff eine herausragende Bedeutung zu. In jedem dieser zukünftigen Forschungsthemen, die gemeinsam mit dem Lehrstuhl Gießertechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg angegangen werden, ist die Material- und Energieflusssimulation ein entscheidender Baustein, um die Folgen der technologischen Transformation eines bestehenden Gießereibetriebes detailliert abzubilden.

2.2.2 Energieeffizienz durch Abwärmeverstromung

Energieintensive Industriebranchen wie Aluminiumgussbetriebe erzeugen hochenergetisches Abgas, dessen Energie nur teilweise zur Erzeugung der benötigten Prozesswärme verwendet wird. Ein Großteil des Abgases verlässt die Anlage in Form von ungenutzter Abwärme im Rauchgas. Diese Energie im Abgas gilt es energetisch zu nutzen. Gelingt dies, führt das zu einer Energieeinsparung und infolgedessen zu einer Erhöhung des Gesamtnutzungsgrades der zugeführten Energie. Neben der Rückführung der Abwärme in den Prozess (z.B. zur Materialvorwärmung) oder der betriebsinternen Verwendung (z.B. für die Gebäudebeheizung) bietet sich vor allem bei einer hohen Abgastemperatur und hoher thermischer Leistung die Umwandlung der ungenutzten Abwärme in elektrische Energie mittels einer Mikrodampfturbine an.

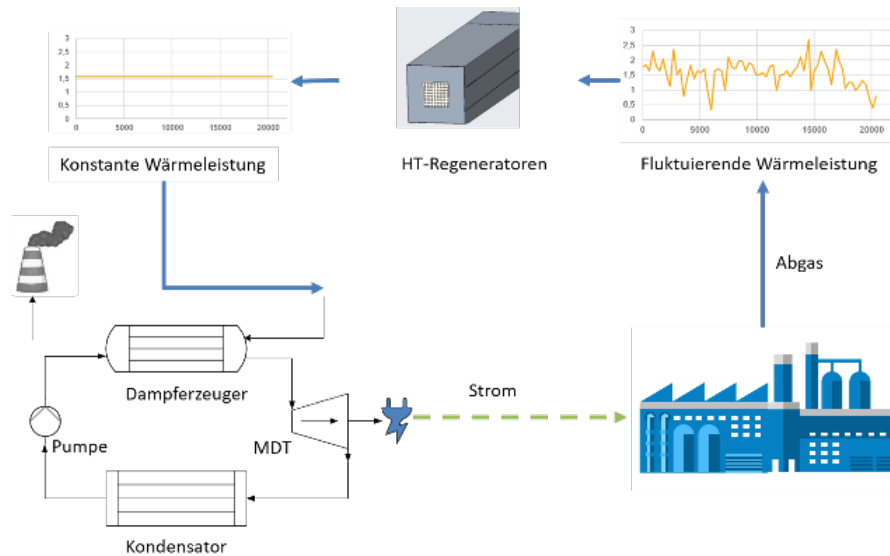


Abbildung 30: Prozessschema der Abwärmeverstromung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll eine Anlage zur Hochtemperatur-Abwärmeverstromung für einen Aluminiumgussbetrieb entwickelt und getestet werden. Der Kern der geplanten Anlage zur Abwärmenutzung besteht aus einer Mikrodampfturbine mit einer thermischen Leistung von 1,2 MW. Für eine lange Lebensdauer der Mikrodampfturbine ist es notwendig, diese unter konstanten Betriebsbedingungen zu betreiben, d. h. eine konstante thermische Leistung am Dampferzeuger bzw. der Dampfturbine zu gewährleisten. Um den zeitlich stark schwankenden Abgasstrom eines Aluminiumschmelzofens zu vergleichmäßigen, eignen sich Regeneratoren für die Zwischenspeicherung der thermischen Energie. Im Rahmen eines geplanten Forschungsprojektes soll die Dimensionierung sowie die Steuerung der Anlage im industriellen Umfeld untersucht werden.

2.2.3 Numerische Auslegung von Gussbauteilen entlang der Prozesskette

Numerische Simulationen als unterstützendes Werkzeug zur Entwicklung und Herstellung zeit- und kostenoptimierter Großgussbauteile erlangen in der industriellen Anwendung immer größere Bedeutung. Bisher existieren Simulationstools für die Auslegung und Prüfung von Gussbauteilen meist als Insellösungen. Aktuell gibt es noch keine einheitliche Definition der Prozesskette zur Konstruktion und Auslegung von Eisengussbauteilen in der Branche. Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Softwaretools als Basis für eine funktionierende Prozesskette ist auf Grund von fehlenden oder nicht hinreichend dokumentierten herstellereigenen Schnittstellen nur bedingt möglich. Hier setzt das öffentlich geförderte Projekt DNAguss an, in dem zwei Eisengießereien, verschiedene Software-Unternehmen und drei Forschungsinstitute zusammenarbeiten, um die einzelnen Simulationsprogramme zu einer virtuellen Prozesskette zu verknüpfen.

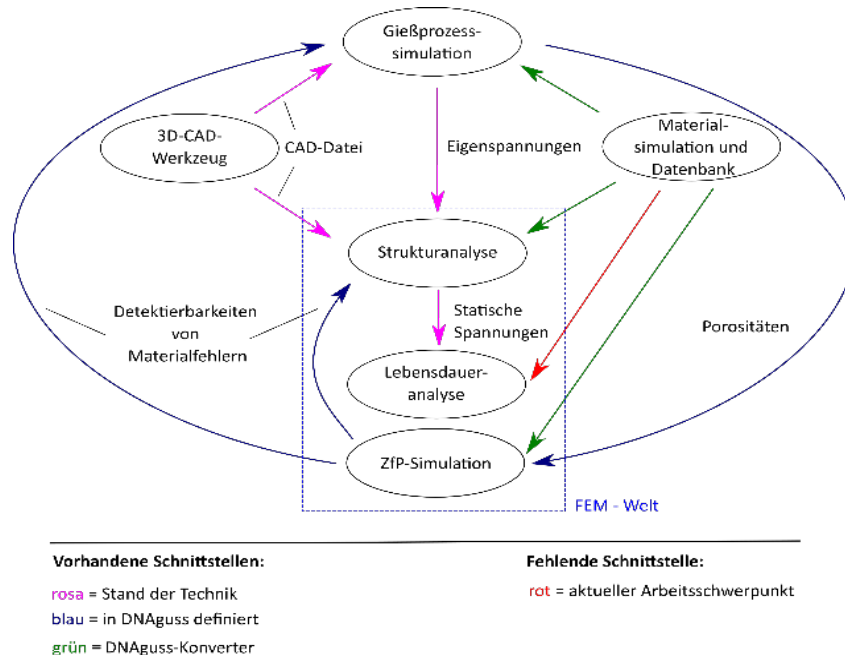


Abbildung 40: Numerische Prozesskette im Eisenguss

Ein entscheidender Beitrag dazu ist die Implementierung von Schnittstellen zwischen den einzelnen Tools in der Softwarekette. Die gießtechnische Analyse eines Bauteils beginnt mit dem Import des 3D-CAD-Modells in die CAE-Anwendungen Gießprozess-Simulation und Strukturanalyse. Beide Simulationstools diskretisieren für ihre Berechnungen die Geometrie jeweils mit einem dreidimensionalen Berechnungsnetz (Meshing). Die Gießprozess-Simulation berechnet den Fließvorgang mit der anschließenden Erstarrung der Schmelze in der Form. Der Informationsfluss von der Gießprozesssimulation zur Strukturanalyse basiert auf den in der Erstarrungsphase entstehenden lokalen Eigenspannungen (Vorbelastungen für das Bauteil). Unter Berücksichtigung der lokalen Eigenspannungen bestimmt die Strukturanalyse die resultierenden Spannungen, die nach der Wirkung der aufgetragenen ruhenden Betriebslasten und der Massenkräfte entstehen. Die FEM-basierte Lebensdaueranalyse untersucht anhand der Spannungen die Bauteil-Lebensdauer und bestimmt eine lokale Schadenssumme. Dadurch lassen sich bezüglich ihrer Lebensdauer kritische Bauteilregionen identifizieren. Ein Zusatz in der Konstruktionspraxis der Gussindustrie ist das stand-alone-Tool für Materialsimulation, welches Berechnungen am gewählten Material durchführt und die Ergebnisse in einer Datenbank speichert. Ein neues Element der Prozesskette ist die in dem Projekt DNAguss entwickelte Simulation zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), mit der die Anwendbarkeit zerstörungsfreier Prüfmethode für ein Bauteil, auf Regionen bezogen, beurteilt werden kann. Die ZfP-Simulation benötigt die Geometrie des Bauteils, Materialdaten und die orts aufgelöste Porosität des Bauteils aus den vorgelagerten Prozessschritten und liefert die regionsbezogene Anwendbarkeit von Prüfmethode. Fehlende numerische Schnittstellen sind jedoch ein Hindernis, um weitere Daten zwischen den einzelnen Simulationstools auszutauschen und damit Rückkopplungsmechanismen in die Prozesskette einzubauen.

Die Implementierung der fehlenden Software-Schnittstellen erfolgt durch den im Forschungsbereich EFFIZIENZ entwickelten DNAguss-Konverter, durch den erstmals eine durchgängige Konstruktion eines Bauteils durch Anwendung von Gießprozess-Simulation, Analyse der Lebensdauer und ZfP-Simulation ermöglicht wird.

2.2.4 Leistungssteigerung von Windkraftanlagen

Erneuerbare Energien sind die Säule der Energiewende und die wichtigste Stromquelle in Deutschland. Bis 2025 soll der Anteil an erneuerbarer Energie am Bruttostromverbrauch auf bis zu 45 % gesteigert werden und eine tragende Rolle wird dabei die Windenergie einnehmen. Insbesondere der Ausbau der Windenergie an Land gilt als eine der kostengünstigen Sparten der erneuerbaren Energien und soll von aktuell 56 GW (2021) bis auf eine installierte Leistung von 71 GW im Jahr 2030 gesteigert werden. Um diese Ziele zu erreichen, müssen alle Ansätze zur Steigerung des Ertrags von Windenergieanlagen (WEA) verfolgt werden. Das Projektvorhaben *WindBreaks* hat das Ziel, die

Strömungsgeschwindigkeit der Luft vor Windenergieanlagen durch Baumreihen zu erhöhen und so zu einer Leistungssteigerung der WEA beizutragen. Zur technischen Umsetzung dieses Vorhabens sind exakte Feldmessungen und hochaufgelöste numerische Simulationen notwendig, um alle strömungsphysikalischen, meteorologischen, botanischen sowie saisonalen Effekte bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit von entsprechenden Maßnahmen zu berücksichtigen.

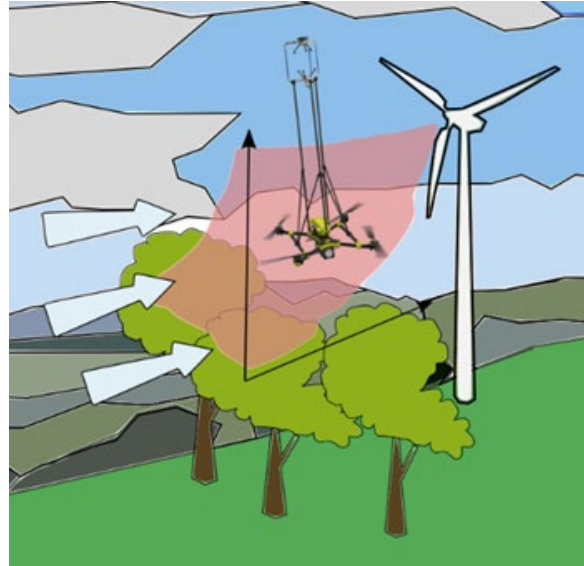


Abbildung 41: Leistungssteigerung von Windenergieanlagen durch Windbreaks

Bäume werden in der Landwirtschaft zum Schutz vor Erosion als Windschutzstreifen verwendet und prägen das Landschaftsbild Süddeutschlands im komplexen Terrain. Mit dem vermehrten Ausbau von Windenergieanlagen sollen in diesem Forschungsvorhaben die Besonderheiten des zum Teil bewaldeten Gebietes genutzt werden und mit Hilfe von Baumreihen als Windschutzstreifen (WSS) die Volllaststunden von WEA gezielt erhöht werden.

Bisherige Untersuchungen zur Steigerung des Leistungsertrags von WEA durch Windschutzstreifen wurden bisher nur im Windkanal an verkleinerten Modellen und in der numerischen Simulation eines spezifischen Windparks durchgeführt. Dabei zeigt sich das große Potenzial von Windschutzstreifen. So konnte im Windkanal eine Leistungssteigerung von 15 % und in numerischen Untersuchungen von über 20 % ermittelt werden. Diese vielversprechenden Forschungsergebnisse sind der Motivator für das beantragte Vorhaben. Sie zeigen zwar auf, dass der physikalische Effekt der Strömungsüberhöhung vorhanden ist, jedoch lassen Sie Fragestellungen wie die technische Umsetzung, die Auswirkungen auf die Windenergieanlage sowie meteorologische und botanische Effekte offen. Die Antwort auf diese Fragen sind jedoch für die Beurteilung einer konkreten Umsetzbarkeit entscheidend. Im Projekt *WindBreaks* erfolgt eine fundierte Beurteilung der Leistungssteigerung von Windenergieanlagen durch Windschutzstreifen mittels messtechnischer und numerischer Untersuchung der Windcharakteristik. Über Parameterstudien werden botanische, saisonale und anlagenspezifische Effekte untersucht und in eine Ertragsberechnung implementiert. Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Großbaumverpflanzung an Bestands- sowie an Neuanlagen durchgeführt. Kooperationspartner sind neben der N-Ergie AG, die OPTOLUTION Messtechnik GmbH als Messdrohnenhersteller sowie die Opitz GmbH & Co. KG, die sich auf Großbaumverpflanzungen spezialisiert hat.

2.2.5 ZIM-Netzwerk DigiGuss

Die im EnCN aufgebauten Kompetenzen sollen nach Abschluss der zweiten Förderphase zielgerichtet für den Technologietransfer genutzt werden. Hierzu wurde im vergangenen Jahr das ZIM-Netzwerk „Digitalisierung und Ressourceneffizienz in der Gießerei-Industrie“ (DigiGuss) entwickelt. Das Netzwerk fokussiert auf die Entwicklung von konkreten Maßnahmen zur Verbesserung von Energie- und Ressourcen-Effizienz sowie den Einsatz digitaler Lösungen. Die Entwicklungen werden im Rahmen von geförderten anwendungsnahen F&E-Projekten, die im Netzwerk geplant und umgesetzt werden, erfolgen.

Nachstehend sind beispielhaft einige angestrebte Entwicklungsschwerpunkte dargestellt:

- Abwärmenutzung aus dem Gießereiprozess
- Integriertes Wärme- und Ressourcen-Management
- Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Gesamtprozess
- Anpassung der Anlagentechnik an alternative Energieträger (Strom, Wasserstoff, etc.)
- Ressourcenoptimierte Produktionssteuerung
- Optimierung der digitalisierten Bauteilplanung
- Identifikation von Einsparpotentialen durch Simulation von Material- und Energieflüssen
- KI-basierte Ansätze zur Produktionsoptimierung
- Entwicklung eines Monitoring-Prozesses zum Benchmarking spezifischer Effizienzkennwerte

Neben den akademischen Gründungspartnern HS Ansbach (Prof. Buchele, Prof. Schlüter) und der FAU (Prof. Müller) konnten insgesamt 9 KMU als Partner für das Netzwerk gewonnen werden. Das Netzwerk wird koordiniert von der ENERGIEregion Nürnberg.

2.2.6 Technologietransfer

Um die erzielten Forschungsergebnisse in der Branche bekannt zu machen, werden regelmäßig Beiträge in der größten europäischen branchenspezifischen Fachzeitschrift, der GIESSEREI und dem Online-Magazin SPOTLIGHTMETAL veröffentlicht. Als Ergänzung des Technologietransfers dienen Präsentationen auf Fachausschuss-Sitzungen des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie, in denen führende Experten aus der Gießereiindustrie Zukunftsthemen diskutieren sowie die Teilnahme an der im zweijährigen Turnus stattfindenden größten europäischen Druckgussmesse EUROGUSS. Weiterhin fand 2019 am Energie Campus Nürnberg unter der Leitung von Prof. Schlüter erstmals die zweitägige Fachtagung *Digitalisierung in der Gießereiindustrie* statt. Darin wurden Probleme und Lösungsmöglichkeiten von namhaften Experten aus Industrie und Wissenschaft einem interessierten Fachpublikum vorgestellt.

In dem ab Januar 2023 gestarteten *Transferzentrum Ansbach für Klimaschutz und Effizienz (TAKE)* bündelt die Hochschule Ansbach ihre Forschungskompetenz in den Bereichen Klimaschutz und Ressourceneffizienz, zwei brennende Themen auch für die KMUs in der Region Mittelfranken, deren Brisanz durch die aktuelle politische Entwicklung noch unterstrichen wird. Das Projekt besitzt eine Laufzeit von 5 Jahren und wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) mit einer Summe von 1,4 Millionen € gefördert. Mit Hilfe von Kooperationsprojekten wird durch die Erschließung neuer Markt- und Kundenkreise die Wettbewerbsfähigkeit der regionalen Industrie langfristig gesichert. Die Schwerpunkte des TAKE liegen in den Bereichen

- Erfassung, Aufbereitung und Auswertung energiebezogener Daten
- Simulationsbasierte Analysen zur Steigerung von Energie- und Materialeffizienz sowie
- Materialentwicklung und -analyse.

3 Strategische Entwicklung in der Arbeitsgruppe „Effizienz“

Der Forschungsschwerpunkt EFFIZIENZ im EnCN setzt sich aus den beiden Arbeitsgruppen „Energieeffiziente Gebäude“ und „Energieeffiziente Industrie“ zusammen. Abbildung 42 zeigt den Aufbau und die Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“.

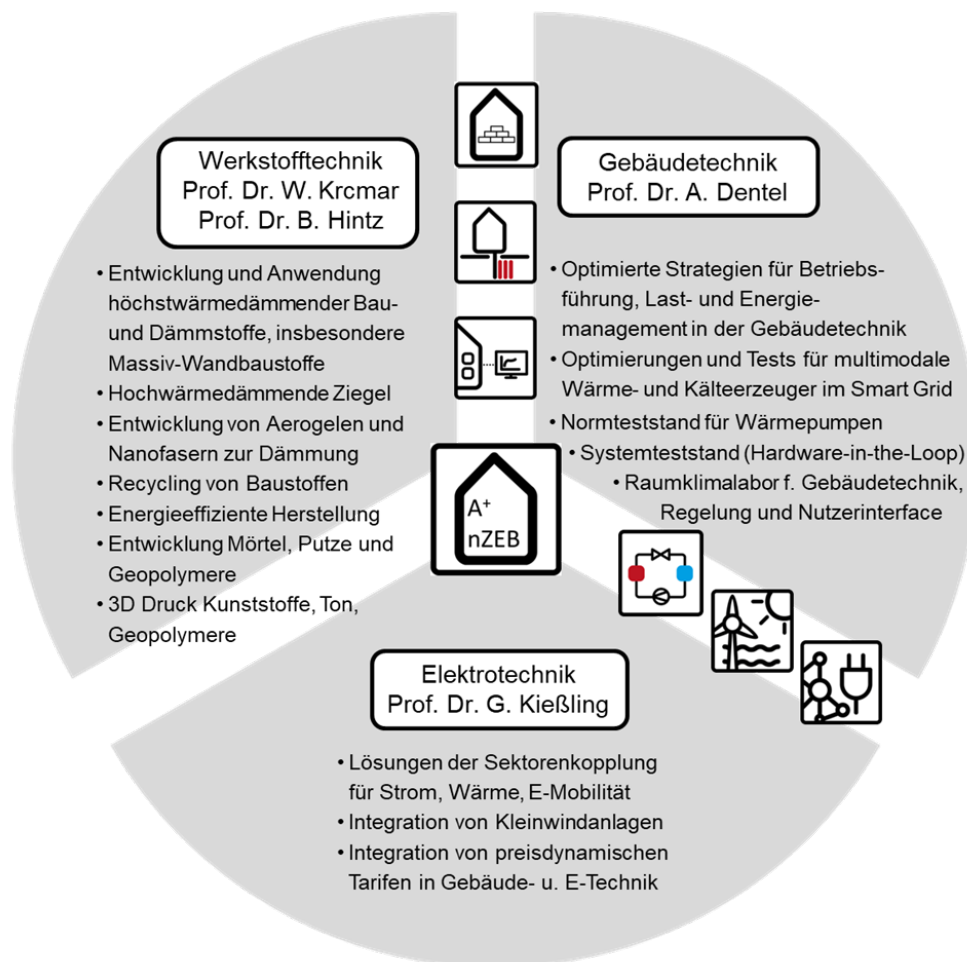


Abbildung 42: Aufbau und Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“.

Aus der Darstellung geht die derzeitige Struktur der Arbeitsgruppe hervor. Bereits während der ersten beiden EnCN-Förderphasen haben sich die drei Akteure und ihre jeweiligen Mitarbeiter in ihren Einzeldisziplinen ergänzt und sehr erfolgreich zusammengearbeitet. Aus diesem Grund soll die Struktur der Arbeitsgruppe auch in Zukunft weitergeführt werden. Während die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dentel das Themengebiet „Gebäudetechnik“ bearbeitet, deckt die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Kießling das Arbeitsgebiet „Elektrotechnik“ ab. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar entwickelt neuartige „Energieeffiziente Werkstoffe“ im Allgemeinen und hochwärmedämmende Wandbaustoffe im Speziellen. Im Zuge einer Nachfolge-Regelung für Prof. Dr. Krcmar wurde im März 2022 Frau Prof. Dr. Hintz berufen und verstärkt seither die Arbeitsgruppe.

Abbildung 43 zeigt den Aufbau und die Zusammenarbeit innerhalb der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Industrie“. Bereits im Verlauf der zweiten Förderphase des EnCN formierten sich die drei Arbeitsgruppen zu einer größeren Forschungsplattform. Aufgrund der sehr guten fachlichen Ergänzung der Mitglieder der Arbeitsgruppe wird die erfolgreiche Zusammenarbeit auch in Zukunft fortgesetzt. Während die Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Kremser und von Prof. Dr. Dietz ihre Kompetenzen auf den Gebieten „Effiziente Antriebe“ und „Effiziente Antriebssysteme“ einbringen, ermittelt Prof. Dr. Schlüter mit seinen Mitarbeitern „Energiedaten“ von Thermoprozess-Anlagen, wertet diese aus, visualisiert die Ergebnisse für die Industriebetriebe und führt energetische Optimierungen durch. Im Zuge einer

Nachfolge-Regelung für Prof. Dr. W. Schlüter wurde im Jahr 2022 Prof. Dr. A. Buchele an die Hochschule Ansbach berufen und verstärkt seither die Arbeitsgruppe.

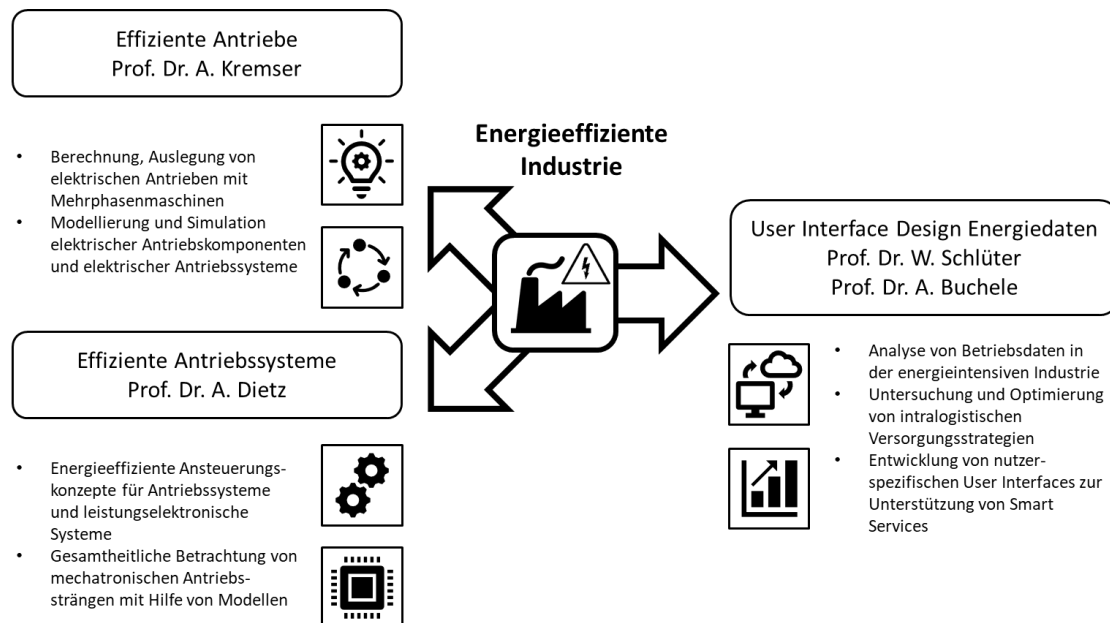


Abbildung 43: Aufbau und Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“.

Alle genannten Akteure sind in der Lage, nationale, EU-weite und internationale Drittmittelprojekte zu beantragen sowie bilaterale Aufträge in Zusammenarbeit mit der Industrie durchzuführen. Zukünftig sollen insbesondere anspruchsvolle Themen aus den Förderprogrammen der Europäischen Kommission sowie dem 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung verstärkt bearbeitet werden.

4 Schlussworte

Die Akteure in den beiden Arbeitsgruppen von „Effizienz“ haben im Berichtszeitraum alle geplanten Forschungsarbeiten sehr erfolgreich durchgeführt. Als Leuchtturmprojekt für den EnCN kann das Modellvorhaben „Herzo Base - Energiespeicherhäuser“ angesehen werden, dass jetzt mit dem Folgeprojekt „Herzo Opt“ das zugehörige Langzeit-Monitoring abgeschlossen hat. Am 19.10.2022 erhielt das Vorhaben den „Bayerischen Energiepreis 2022“ in der Kategorie „Gebäude als Energiesystem / Gebäudekonzept“. Die Arbeitsgruppe war auch im Jahr 2022 bei der Beantragung neuer Forschungsvorhaben und der Einwerbung zusätzlicher Drittmittel besonders erfolgreich. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und die Laborausüstung weiter ausgebaut werden. Die gesamte Arbeitsgruppe bestand im Berichtszeitraum aus 39,5 Mitarbeitern zuzüglich der beteiligten Professoren und einer ganzen Batterie von Studierenden, die als studentische Hilfskräfte in den Projekten mitarbeiten. Zusammen mit 54 Industriepartnern wurde/wird an 45 laufenden F&E-Projekten gearbeitet; bewilligte neue Vorhaben wurden gestartet und an Neuanträgen und Publikationen wurde/wird ständig gearbeitet.

In der Außendarstellung wissenschaftlicher Arbeiten, der Durchführung von Veranstaltungen, Vorträgen, Kooperationen und Vernetzung mit Forschungspartnern und Industriebetrieben sowie bei Publikationen sind beide Arbeitsgruppen besonders aktiv. In der Arbeitsgruppe „EFFIZIENZ“ haben im Förderzeitraum 2022 insgesamt 14 Doktoranden an ihren Promotionen gearbeitet. Davon wurden zwei Promotionen erfolgreich abgeschlossen. Sowohl die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“ als auch die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Industrie“ haben erfolgversprechende Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt und bauen diese weiter aus.

5 Vorträge & Poster 2022

- [1] Kugler, F., Krcmar, W. und Teipel, U.: "Construction and demolition residuals as raw materials for the production of geopolymer building materials"; 46th International Conference and Exposition on advanced Ceramics and Composites, 17.01.2022, Daytona Beach Florida, USA.
- [2] Kugler, F. und Krcmar, W.: "Development of non-fired building materials based on wastes – Development of the waste mixture and determining of the process variables"; Monitoring meeting EU-Project LIFE18 CCM/ES/001114, brick factory MORA, Toledo/Spain, 29.06.2022.
- [3] Kugler, F. und Krcmar, W.: „Geopolymerbasierte Baustoffe aus Reststoffen der Bau- und Abbruchindustrie“; Monitoring meeting EU-Project LIFE18 CCM/ES/001114, Ziegelwerk Schlagmann, Zeilarn, 29.09.2022.
- [4] Kugler, F., Krcmar, W. und Teipel, U.: "The influence of construction waste from concrete on the alkaline activation process of new fly ash-based geopolymer construction materials"; Future Materials 2022, 05.10.2022, Rom, Italy.
- [5] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: „Einfluss der Porengeometrie auf die Thermoschockeigenschaften keramischer Hochtemperatur-Wärmespeichermaterialien“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann/PD Dr. Stefan Stöber, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 06.04.2022, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [6] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: „Einfluss der Bauteil- und Porengeometrie auf die Thermoschock-Eigenschaften und Zyklenstabilität keramischer Hochtemperatur-Wärmespeichermaterialien“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann/PD Dr. Stefan Stöber, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 14.12.2022, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [7] Dentel, A.: „Energie- und lastflexible Gebäude- und Anlagenkonzepte“; Fachveranstaltung Wärmewende und energieeffiziente Gebäude, Energie Campus Nürnberg, 05.05.2022, Nürnberg.
- [8] Dentel, A. und Betzold, C.: „Modellbasierte Regelung und praktischer Betrieb von Plusenergiegebäuden: das Projekt Herzo Opt in der Monitoring-Phase“; Energiewendebauen, EWB-Stunde am 02.06.2022, online.
- [9] Dentel, A. und Bordin, S.: „Multifunktionales Fassadenelement für den Geschosswohnungsbau – Aktive Gebäudehülle“, 3. Kongress Energiewendebauen, 9.-10.06.2022, Wuppertal.
- [10] Betzold, C. und Dentel, A.: „Simulation and operation of a heat pump system in a terraced house complex – Research project „Herzo Opt““, HP_sim22 Workshop and Carnot Usermeeting, 30.06.2022, Innsbruck, Österreich.
- [11] Betzold, C., Dentel, A. und Hummel, S.: „EnEff:Stadt: Verbundvorhaben „HerzoOpt - Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“, 12. Projektleitungstreffen Energiewendebauen, 09.-10.11.2022, Petershagen.
- [12] Betzold, C. und Dentel, A.: „Monitoring und Simulation eines geothermischen Wärmepumpensystems in einem Plus-Energiegebäude“, European Geothermal Congress 2022, Berlin, 17.-21.10.2022, online.
- [13] Kremser, A.: „Messung und Berechnung umrichterbedingter Verluste bei Asynchronmaschinen“; Seminar „Echtzeitanalyse und Leistungsmessung von elektrischen Maschinen und Stromrichtern“, 10.03.2022, THN.
- [14] Graß, N. und Dietz, A.: „Synergie von Elektromobilität und Stromerzeugung für ein klimaverträgliches und CO₂ freies Verkehrssystem; Ringvorlesung Nachhaltigkeit, 11.05.2022, THN.
- [15] Graß, N. und Dietz, A.: „Mit Elektromobilität und regenerativem Strom CO₂-frei in die Zukunft“; Lange Nacht der Wissenschaften, 21.05.2022, THN.

- [16] Kremser, A. und Dietz, A.: „Grundlagen elektrischer Antriebe und deren Verluste. Bauformen, Gliederung elektrischer Maschinen, Fertigungsschritte, aktuelle Trends und Entwicklungen“; Fachworkshop „Produktion elektrischer Antriebe“, 22.-23.06.2022, THN.
- [17] N. Adamchuk, B. Rösch, W. Schlüter, F. Reissner, J. Baumgartner, J. Olofsson: „Coupling of simulation tools and experimental data to predict local fatigue limits in ductile iron castings“; Södertälje, 2022.
- [18] J. Dettelbacher, D. Wagner, A. Buchele, W. Schlüter: „Kopplung einer Material- und Energieflusssimulation mit Reinforcement-Learning-Algorithmen“; ASIM SST 2022, Wien, 2022.
- [19] W. Schlüter: „Energieeffizienz durch Digitalisierung“; Gießerei 4.0, Sonthofen, 2022.

6 Veröffentlichungen 2022

- [1] Kugler, F., Fehn, T., Harder, M., Krcmar, W. und Teipel, U.: „Recycling von Sekundärrohstoffen – Wie gut eignen sich Sekundärrohstoffe der Abbruch- und Bauindustrie zur Herstellung neuartiger Geopolymer-Baustoffe?“; Minerals Processing 11 (2022) Bauverlag BV, Gütersloh.
- [2] Kugler, F., Fehn, T., Sandner, M., Krcmar, W. und Teipel, U.: “Microstructural and mechanical properties of geopolymers based on brick scrap and fly ash”; Int. J. Ceramic Eng. Sci., 1–10 (2022). <https://doi.org/10.1002/ces2.10120>.
- [3] Kugler, F., Aumüller, J., Krcmar, W. und Teipel, U.: “Construction and Demolition Residuals as Raw Materials for the Production of Novel Geopolymer Building Materials”; Crystals 12 (5), 678 (2022). <https://doi.org/10.3390/cryst12050678>.
- [4] Kugler, F.; Karrer, J., Krcmar, W. und Teipel, U.: “Setting behavior and mechanical properties of concrete rubble fly ash geopolymers”; Open Ceramics 11 (2022), S. 100286. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100286>.
- [5] L. Rabenstein, M. Schmidt, A. Dietz and N. Parspour: “Construction and Measurement of a Laminated Transverse Flux Machine”; International Conference on Electrical Machines (ICEM), 5.-8. September 2022, Valencia Conference Centre, Spain.
- [6] V. Hoppe, T. Schindler, M. Hoerner, A. Dietz, R. Kennel: “On-Chip Simulation of a Nine-Phase Electrical Drive and Power Electronics for Rapid Control Prototyping Applications”; Innovative Small Drives and Micro-Motor Systems; 13th GMM/ETG-Symposium, IKMT 14./15.09.2022, Johannes Kepler Universität Linz, Österreich.
- [7] Betzold, C. und Dentel, A.: “Comparison and implementation of MPC and simple predictive control into a heat pump system”; CLIMA2022, proceedings of the REHVA 14th HVAC World Congress, 22.-25.05.2022, Rotterdam, The Netherlands. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.154>.
- [8] Hummel, S., Betzold, C. und Dentel, A.: “Impact of the Weather Forecast Quality on a MPC-driven Heat Pump Heating System”, CLIMA2022, proceedings of the REHVA 14th HVAC World Congress, 22.-25.05.2022, Rotterdam, The Netherlands. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.152>.
- [9] W. Schlüter, J. Dettelbacher, N. Adamchuk: „Ressourceneffiziente Produktion in Gießereien durch Digitalisierung“; Giesserei 109, S. 40–42, 2022. (B)
- [10] K. Zacharias, D. Welsch, W. Schlüter, A. Buchele: „Numerische Simulation einer asymmetrischen Drallströmung - Vergleich der numerischen Turbulenzmodellierung mit experimentellen Messungen“; ASIM SST 2022 Proceedings Kurzbeiträge, S. 43–46, 2022. (A)
- [11] J. Dettelbacher, D. Wagner, A. Buchele, W. Schlüter: „Kopplung einer Material- und Energieflusssimulation mit Reinforcement-Learning-Algorithmen“; ASIM SST 2022 Proceedings Kurzbeiträge, S. 21–24, 2022. (B)
- [12] C. Birkefeld, N. Adamchuk, B. Rösch, W. Schlüter: „Einbindung der Simulation zur Prüfbarkeit von Großgussteilen in die Softwarekette der Konstruktion“; Gießerei 04/2022, S. 38–43, 2022. (B)

- [13] N. Adamchuk, B. Rösch, W. Schlüter, F. Reissner, J. Baumgartner: „Coupling of Simulation Tools for Obtaining Local Fatigue in Combination with Experimental Data“; ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge, S. 235–241, 2022. (A)

7 Patente 2022

- [1] Sebastian Schmidt und Wolfgang Krcmar (THN): „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“ (DE 10 2017 128 150 A1 und WO 2019/105877 A1).

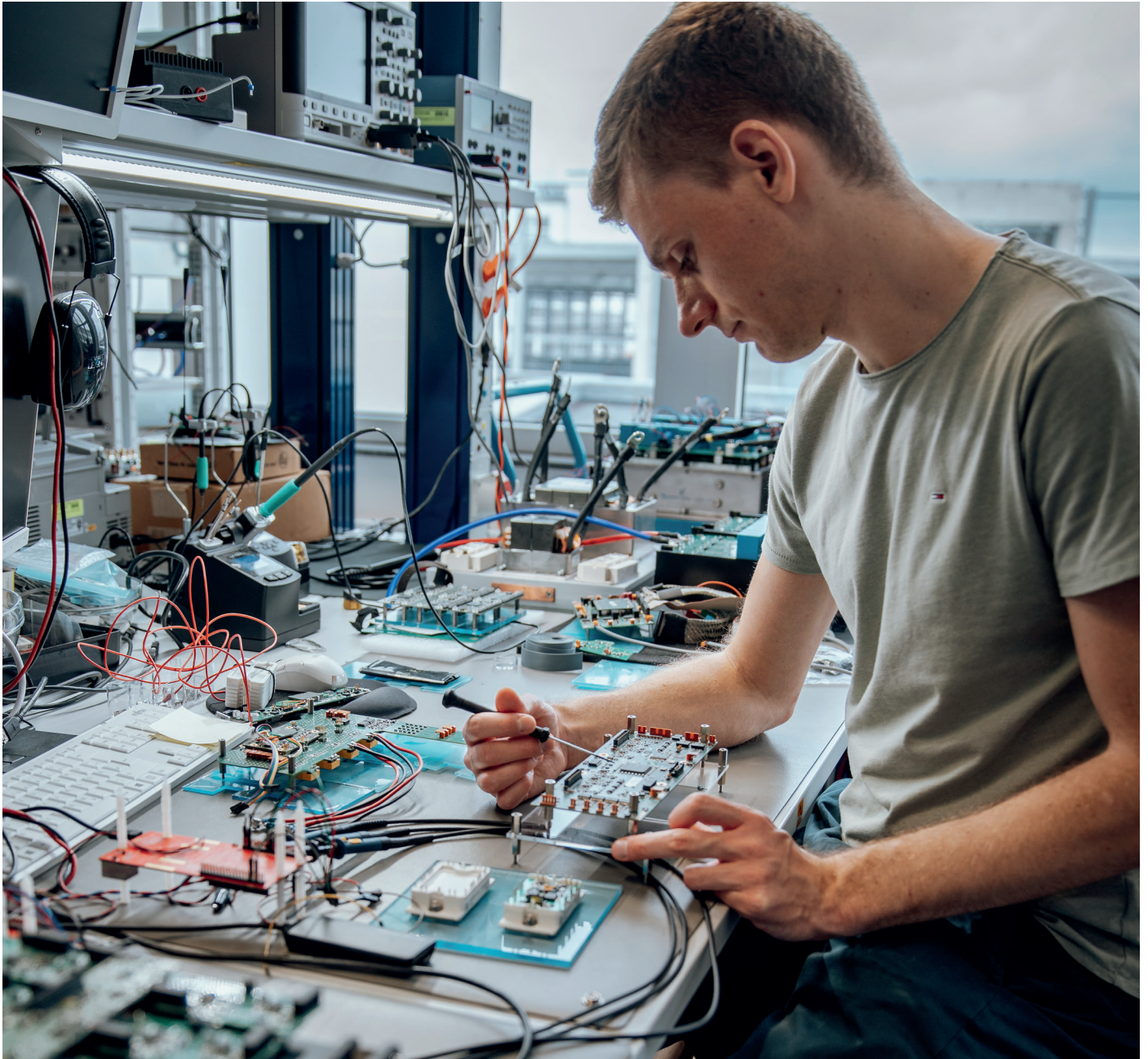
8 Promotionen 2022

In der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Industrie“, Teilprojekt „Energieeffiziente energetische Antriebe“ von Prof. Dr. Dietz und Prof. Dr. Kremser wurden im Jahr 2022 zwei Promotionen abgeschlossen:

- [1] M.Sc. Sebastian Wendel: „Model Predictive Control of Small Mechatronic Drive Systems with PM Synchronous Machines“; Promotionsvortrag 28.11.2022, Technische Universität München.
- [2] M.Sc. Michael Gerstner: „Untersuchung von Netzteilen mit großem Eingangsspannungsbereich“; Promotionsvortrag 22.12.2022, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

FORSCHUNGSBEREICH

Energiemanagement-Technologien



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Martin März
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Fraunhofer IISB

E-Mail
martin.maerz@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 99310

Web
www.encn.de/EMT

Lehrstuhl für Leistungselektronik

Überblick

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik (LEE) wurde 2016 als erster aus dem Energie Campus Nürnberg entstandener Lehrstuhl des Departments Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) gegründet.

Mit der Leistungselektronik steht DIE Schlüsseltechnologie für das elektrische Energiemanagement im Fokus des Lehrstuhls. Leistungselektronik steuert und wandelt elektrische Energie und findet sich in vielfältigster Weise entlang der gesamten Energiekette wieder. Damit ist Leistungselektronik die Grundvoraussetzung für jede Art der intelligenten und effizienten Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie.

Die Forschungsschwerpunkte am Lehrstuhl LEE liegen im Bereich der Schaltungs- und Systemtechnik für die Leistungselektronik. Dies reicht vom Ausloten der Potentiale moderner Leistungshalbleiterbauelemente über innovative Integrationstechnologien, Fragen der Lebensdauer und Verfügbarkeit, der Netzstabilität und Schutztechnik bis hin zur Erarbeitung nachhaltiger Systemkonzepte für die Elektromobilität zu Land und in der Luft. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung fallen der Leistungselektronik zunehmend auch Aufgaben der Anlagen-, Netz- und Prozessüberwachung zu. Auch hierfür werden innovative Lösungsansätze wissenschaftlich untersucht.

Der Lehrstuhl LEE kooperiert eng mit dem Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB). Gemeinsam bilden beide Einrichtungen den Kern des EnCN-Forschungsbereichs Energiemanagement-Technologien (EMT). Darüber hinaus kooperiert der Forschungsbereich EMT des EnCN eng mit dem Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE), einer Initiative der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der beiden Fraunhofer Institute IIS und IISB.

Einer der Forschungsschwerpunkte am Lehrstuhl LEE ist Leistungselektronik für die Elektrifizierung der Luftfahrt. Um Luftverschmutzung und Lärm zu reduzieren, verfolgt die Luftfahrtindustrie intensiv verschiedene Konzepte in Richtung eines „More Electric Aircraft“ bzw. „All Electric Aircraft“. Die dazu notwendige Elektrifizierung erfordert jedoch bahnbrechende Innovationen. Erste Forschungsarbeiten dazu erfolgten von 2018 bis 2022 im Rahmen des EU-Projekts NENUFAR. Darauf aufbauend konnte im Jahr 2021 mit GENESIS ein weiteres Clean Sky Projekt am Lehrstuhl gestartet werden. Innerhalb von GENESIS erarbeiten neun Partner aus Industrie und Forschung einen Technologie- und Nachhaltigkeitsfahrplan für den Übergang zu umweltverträglichen und wettbewerbsfähigen elektrischen und hybriden Flugzeugsystemen. Dies erfolgt beispielhaft anhand von Konzeptdesigns für vollelektrische und hybride 50-PAX-Regionalflugzeuge. Dazu werden verschiedene alternative Antriebsstrangkonzeppte untersucht, darunter konventionelle Batterien, Gasturbinen, Brennstoffzellen und Hybridkombinationen davon, alle mit drei Zeitperspektiven über den Zeitraum 2020-2050. Diese Untersuchungen basieren auf technologischen Vorausschauanalysen zu Schlüsselementen des Flugzeugsystems mit einem Schwerpunkt auf der Antriebsstrangarchitektur und auf Energiespeicheralternativen. Für jede Komponente und jeden relevanten Technologieprozess innerhalb des Flugzeuglebenszyklus - von der Ressourcengewinnung über die Herstellung und Nutzung bis zum Lebensende – werden Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen) erstellt und dazu verwendet, um prospektive Lebenszyklusbewertungen zukünftiger Flugzeugsystemkonfigurationen und -szenarien durchzuführen.

KONTAKT

Prof. Dr. Martin März
Lehrstuhlinhaber LEE
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Fraunhofer IISB



E-Mail
martin.maerz@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 99310

Web
www.lee.tf.fau.de

Gerade für Luftfahrtanwendungen stellt kryogener Wasserstoff eine hoch interessante Kraftstoffalternative dar. Um das Potential dieses Ansatzes auszuloten, wurde 2022 das EU-Projekt NEWBORN konzipiert, beantragt und bewilligt. Das Projekt unter der Leitung des Luftfahrtzulieferers Honeywell startet am 01.01.2023 unter Beteiligung des Lehrstuhls LEE, der umfangreiche Untersuchungen zur Auslegung des kryogenen elektrischen Antriebsstrangs beitragen wird.

Basierend auf den langjährigen Erfahrungen und wissenschaftlichen Vorarbeiten am Fraunhofer IISB und Lehrstuhl LEE auf dem Gebiet dezentraler Gleichspannungsnetze konnte der Lehrstuhl LEE gemeinsam mit dem auch „auf AEG“ ansässigen Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) ein Projekt im Rahmen der AiF-Ausschreibung für Leittechnologieprojekte gewinnen. Das Verbundprojekt DC|hyPASim startete zum 1. März 2022 und umfasst die beiden Teilprojekte DC|hyPATwin (FAPS) und DC|hyPAMod (LEE). Ziel ist die digitale Abbildung, Simulation und Inbetriebnahme von hybriden AC/DC-gespeisten Produktionsanlagen kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU). Der Fokus des Lehrstuhls LEE liegt hierbei auf der elektrischen Simulation des DC-Netzverbunds und dessen Zusammenspiel mit dem AC-Netz. Die Ergebnisse des Verbundprojekts DC|hyPASim sollen es Firmen ermöglichen, eine verlässliche Voraussage der Machbarkeit und des Energieeinsparpotentials bei einer Teil- oder Gesamtumstellungen auf eine Gleichspannungsversorgung ihrer Produktionsanlagen zu erhalten. Das Projekt wird von einem Projektausschuss mit über 30 Partnern aus Industrie und Forschung begleitet.

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik ist heute mit Blick auf Zukunftsthemen wie Elektromobilität und Energiewende ein zentraler Baustein der Ingenieursausbildung an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Insbesondere für die im süddeutschen Raum sehr starke Automobil- und Zulieferindustrie sind die Absolventen eine wichtige Unterstützung im gegenwärtigen Transformationsprozess. Der Lehrstuhl bildet zudem eine fachliche Brücke zwischen der Mikroelektronik und der elektrischen Energietechnik. Insbesondere die enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IISB wird auch in Zukunft der Schlüssel für einen schnellen Technologietransfer aus der Forschung in die Anwendung sein.

Das Vorlesungsangebot des Lehrstuhls LEE umfasst wesentliche Kernkompetenzen der Leistungselektronik:

- Leistungselektronik - Grundlagen
- Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang
- Power Electronics for Decentral Energy Systems
- Thermisches Management in der Leistungselektronik
- Elektrische Energiespeichersysteme (WS) und Electrical Energy Storage Systems (SoSe)
- Zustandsdiagnostik technischer Isolierstoffe

Dazu kommen Praktika und Seminare. Das Lehrangebot adressiert eine breite Hörerschaft aus den Ingenieurwissenschaften, insbesondere Studierende der Studienrichtungen „Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik“ (EEI), Energietechnik, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen. Mit dem Ausbau englischsprachiger Vorlesungen wird ein zunehmend internationaler Studierendenkreis adressiert – beispielsweise im Rahmen der neuen Studienrichtungen „Electromobility-ACES“ und „Clean Energy Processes“.

Das hervorragende Niveau der studentischen Abschlussarbeiten am Lehrstuhl LEE wird durch regelmäßige Preise und Auszeichnungen belegt, im Jahr 2022 insbesondere durch den VDE-Bayern Award 2022, den Masterpreis der Firma Baumüller sowie den EnCN-Energiepreis für zwei Masterarbeiten.



Abbildung 1: VDE Bayern Award 2022 verliehen an Frau Eva Nistler für ihre Bachelorarbeit
Feierliche Preisverleihung im Hotel Bayerischer Hof in München in Gegenwart von Staatsminister Dr. Florian Herrmann, VDE
Präsident Prof. Dr. Armin Schnettler und dem Generaldirektor des Deutschen Museums Prof. Dr. Wolfgang Heckl

DC|hyPASim - Digitale Planung und Simulation hybrider AC/DC-Energienetze in automatisierten Produktionsanlagen

Schon vor dem starken Anstieg der Energiepreise in Folge der Krise im Winter 2022-2023 stieg die Anzahl der auf Industriegebäuden installierten Photovoltaikanlagen und Energiespeichern stetig. Hauptgründe sind Kostensenkung durch Eigenerzeugung und Spitzenlastkappung sowie eine Verbesserung der Ökobilanz.

Die Einbindung von dezentralen Erzeugern und Speichern kann aber durchaus noch effizienter gestaltet werden: Schon heute basieren die meisten Netzkomponenten durch die intern verbaute Elektronik auf Gleichspannung (DC). Diese muss aber aus einem Wechselstrom-Versorgungsnetz durch aufwändige und verlustbehaftete Gleich- oder Wechselrichtervorgänge erzeugt werden. Durch die Einbindung aller DC-fähigen Komponenten in ein Gleichstromnetz können diese unnötigen Verluste eliminiert werden. Dies führt zu einer weiteren Energie- und Kostenersparnis! Dieses Potenzial von Gleichstromnetzen in Produktionsanwendungen ist schon seit längerem durch die Industrie erkannt und auch in anderen Forschungsvorhaben, wie DC-Industrie 1 und 2, untersucht worden. Eine Hürde, die den großflächigen Ausbau der Gleichstromelektrifizierung derzeit behindert, stellt die fehlende Erfahrung und das Wissen bezüglich der Planung, Auslegung und Inbetriebnahme von DC-Netzen dar. Dies stellt ein finanzielles Risiko dar, das vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) nicht tragen können.

Um diese Lücken zu schließen, wird im Rahmen des iGF-Projekts DC|hyPASim an der simulationsgestützten Planung und Auslegung von DC-Netzen in hybriden Produktionsanlagen gearbeitet. Das im März 2022 gestartete Projekt umfasst das Teilprojekt DC|hyPAMod des Lehrstuhls LEE und das Teilprojekt DC|hyPATwin des Lehrstuhls FAPS. Mit Hilfe digitaler Zwillinge der Produktionsanlagen sollen die elektrischen und produktionssystematischen Komponenten modelliert und die Abläufe und das Systemverhalten simuliert werden.

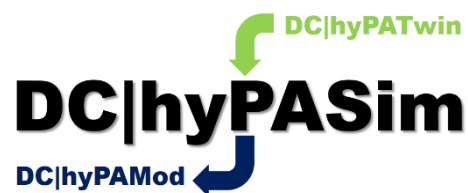


Abbildung 2: DC|hyPASim vereint die Beiträge der Forschungsvorhaben DC|hyPAMod und DC|hyPATwin

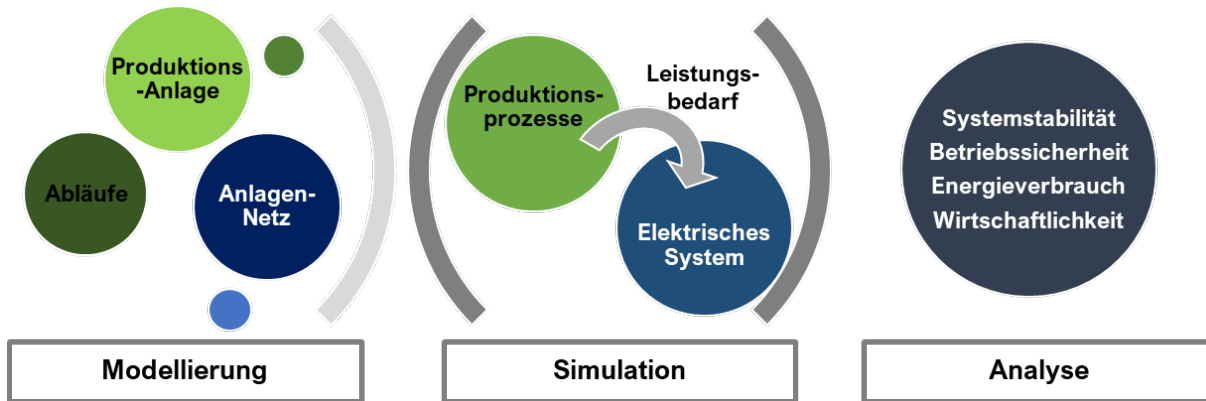


Abbildung 3: Ablaufschema der geplanten Kosimulation des Projektes DC|hyPASim

Dazu muss die Simulation der Prozessabläufe mit der Simulation des elektrischen Verhaltens der Anlage verknüpft werden. Dies soll mit Hilfe eines zu entwickelnden Netz-Planungstools erfolgen. Zusätzlich wird ein begleitender Anlagen-planungsleitfaden erstellt, der Designregeln und Auslegungsansätze für DC-Netze zusammenfasst.

Als Basis für die digitale Planung wird zunächst der Leistungsbedarf der Anlage in einem geeigneten Prozesssimulationsprogramm ermittelt. Die errechneten Leistungsprofile werden anschließend in das Planungstool übernommen, mit dem die verschiedenen Betriebszustände der Anlage abgebildet und elektrische Netzsimulationen durchgeführt werden können. Mit den Ergebnissen dieser Simulationen kann das Netz hinsichtlich Gesichtspunkten wie Betriebssicherheit, Systemstabilität und Energieeffizienz sowie diversen wirtschaftlichen Aspekten untersucht werden.

Das Planungstool wird so konzipiert sein, dass der Nutzer, also die netzplanende Person, keine vertieften Kenntnisse über die Modellierung, elektrische Simulation oder Netzanalyse benötigt. Insbesondere mit Blick auf die Zielanwender Handwerksbetriebe und Planungsbüros soll ein möglichst niederschwelliger Einsatz ermöglicht werden. Das Tool wird die Planung einer gleichstromelektrifizierten Produktionsanlage deutlich vereinfachen und soll vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen den Einsatz regenerativer Energietechnologien erleichtern. Dazu wird auch der begleitende Planungsleitfaden beitragen. Hierfür werden die zum Zeitpunkt der Erstellung geltenden normativen Grundlagen sowie Auslegungsregeln und Designstandards zusammengefasst sowie Lösungsansätze zur Vermeidung häufiger Probleme gegeben.

Die Hauptaufgaben bei der Entwicklung dieser Planungsumgebung sind zum einen die Entwicklung des Tools selbst mit einer nutzerfreundlichen Oberfläche, aber auch die Erstellung von elektrischen Modellen der jeweiligen Komponenten, deren Modellierung im Netzverbund sowie die Einbindung und Integration der Produktionssimulation.

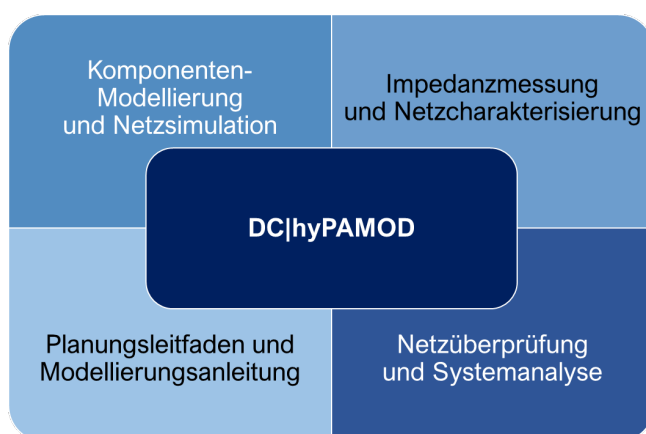


Abbildung 4: Forschungsschwerpunkte im Rahmen des LEE-Teilprojekts DC|hyPAMod

Im Rahmen des Teilprojektes DC|hyPAMod steht für den Lehrstuhl LEE die elektrische Anlagensimulation, die modellgestützte Planung und die simulative Abbildung von Betriebsstrategien für hybride AC/DC-Energienetze im Fokus. Eine Kernfrage beschäftigt sich damit, wie man ein hybrides AC-DC-Netz modelltechnisch geeignet abbilden kann, so dass die Ergebnisse aussagekräftig genug sind, um sie für die Planung, Auslegung und Vorab-Überprüfung des Systems verwenden zu können.

Die Modellierung bekannter Netzkomponenten soll mit Hilfe von White-Box-Modellierungsansätzen umgesetzt und dokumentiert werden. Dieser Modellansatz ist allerdings nur umsetzbar, wenn alle Informationen über den Aufbau und die Funktion einer Systemkomponente,

z.B. eines Umrichters, vorhanden sind. Kommerziell verfügbare, sog. „Off-the-shelf“-Komponenten sind jedoch meist nicht so transparent dokumentiert, womit eine White-Box-Modellierung nicht möglich ist. Daher werden im Forschungsvorhaben auch Ansätze untersucht, unbekannte Komponenten über deren DC-seitige Klemmenimpedanz

innerhalb eines Netzmodells abzubilden. Um dies zu ermöglichen, wird eine neuartige Messmethodik entwickelt, die eine Impedanzmessung im Betrieb, also unter Last, ermöglicht. Über diese Charakterisierung sollen alle Komponenten im Netz bestmöglich abgebildet werden können. Zusätzlich wird der Planungsleitfaden erläutern, wie für selbstentwickelte Systemkomponenten Bibliothekselemente für das Planungstool parametrisiert bzw. eigene Modelle entwickelt werden können. Somit können auch die Hersteller von Systemkomponenten elektrische Modelle ihrer Komponenten zur Verfügung stellen. Solche bereitgestellten Modelle erleichtern die Arbeit der Netzplaner, machen die Produkte dieser Hersteller attraktiver und können damit ein wichtiges Marketinginstrument darstellen.

Unterstützt wird dieses Forschungsvorhaben von einem projektbegleitenden Ausschuss mit Vertretern aus über 30 Unternehmen. Vertreten sind unter anderem Hersteller von Schutztechnik, Netzkomponenten sowie leistungselektronischen Komponenten, aber auch Firmen, die selbst Interesse an einer Gleichstromelektrifizierung in ihren Produktionsstätten haben. Die Größe des Beirats spiegelt das große Interesse an dem Thema und den Forschungsbedarf im Bereich DC-Netzanwendungen wider.

Bearbeitet wird das Projekt von den wissenschaftlichen Lehrstuhlmitarbeitern Melanie Lavery und Raffael Schwanninger. Die Laufzeit des Projektes beträgt drei Jahre.



Abbildung 5: Prof. März bei einem Treffen des Industriebeirats

Vorträge 2022

- [1] März M.: Einführung in die aktiven Bauelemente. Clusterschulung Getaktete Stromversorgung, Bayerisches Cluster Leistungselektronik, Erlangen, 16.-17.02.2022
- [2] März M.: Forschung aus Erlangen für die Mobilität von morgen - zu Lande, zu Wasser und in der Luft. Schüler Infotag, 10.03.2022
- [3] März M.: Nachhaltige dezentrale Energiesysteme - ausgewählte Aspekte und Forschungsarbeiten, Fachveranstaltung „Energiesysteme und Nachhaltigkeit“, EnergieCampus Nürnberg, 10.03.2022
- [4] März M.: Schlüsseltechnologie SiC. Halbleiter Workshop Industrie und Anwendungen, Bayern-Innovativ, 20.05.2022
- [5] März M.: Nachhaltige dezentrale Energiesysteme, Lange-Nacht-der-Wissenschaften, Nürnberg, 21.05.2022
- [6] März M.: transform_EMN – Innovationsplattformen. Sitzung des Stadtrats Nürnberg, 26.10.2022
- [7] März M.: Schnelles Schalten und ausgewählte Anwendungsprobleme. Clusterschulung Ansteuer- und Schutzschaltungen für MOSFET und IGBT, Bayerisches Cluster Leistungselektronik, online, 06.12.2022

Veröffentlichungen 2022

- [1] Hoffmann M., März M.: "A Pre- and Discharge Unit for Capacitive DC-Links Based on a Dual-Switch Bidirectional Flyback Converter", Proceedings of the 24th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE EPE 2022 ECCE Europe, Hannover, 2022, ISBN: 9789075815399
- [2] Amler A., Weitz N., März M.: "On the Influence of the Parasitic Capacitance of a Bridge Rectifier on Series-Resonant Capacitive Wireless Power Transfer Systems", Proceedings of the 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022, Detroit, MI, 2022
- [3] Stutz C., Nielebock S., März M.: "Analytic calculation of touch and leakage currents of non-isolated EV chargers using a fast common mode calculation method and non-ideal passive component models", Proceedings of the 24th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE EPE 2022 ECCE Europe, Hannover, 2022
- [4] Bach H. L., et al.: "Embedding Solutions for vertical SiC and GaN Power Devices", Proceedings of the 9th IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, IEEE WiPDA 2022, Redondo Beach, CA, 2022
- [5] Letz, S. A., Zhao D., März M.: "Mesostructural impact on the macroscopic stress state and yield locus of porous polycrystalline silver", Materials & Design 219 (2022), doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110785

- [6] Büttner S. Nowak A., März M.: "Characterization of a Si and GaN converter at cryogenic temperatures", Cryogenics 128 (2022), doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103594
- [7] Schmied N., Matlok S., März M.: "Analysis of the Zero Overvoltage Switching Phenomenon", IEEE Access 10 (2022): 128263-128275. doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3227442
- [8] Fritsch B., et al.: "Sub-Kelvin thermometry for evaluating the local temperature stability within in situ TEM gas cells", Ultramicroscopy 235 (2022)
- [9] Amler A., Weitz N., März M.: "Improved Capacitive Power Transfer with Non-Resonant Power Transfer Link using Radio Frequency Push-Pull Inverter", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (2022), doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3198336
- [10] Weitz N., et al.: "A Resonant Push-Pull DC-DC Converter With an Intrinsic Current Source Behavior For Radio Frequency Power Conversion", IEEE Transactions on Power Electronics (2022), doi.org/10.1109/TPEL.2022.3142431
- [11] Büttner S., März M.: "Profitability of low-temperature power electronics and potential applications", Cryogenics 121 (2022), doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103392
- [12] Schiedermeier M., et al.: "Analytical Calculation of the RMS Value and the Spectrum of the DC-Link Current of a Dual-Inverter", IEEE Transactions on Power Electronics 37.1 (2022), pp. 782-794. doi.org/10.1109/TPEL.2021.3095520
- [13] Fritsch B., et al.: "Accessing local electron-beam induced temperature changes during in situ liquid-phase transmission electron microscopy", Nanoscale Advances 3.9 (2021): 2466 - 2474.
- [14] Fritsch B., et al.: "Beam-induced heating at low electron fluxes during liquid phase transmission electron microscopy", Microscopy and Microanalysis 27 (2021): 1040-1042.
- [15] Laugner M., Eberle T.: "Influence of the parasitic series inductance of the coupling capacitor of a SEPIC to the coil current waveforms with coupled inductors", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (pp. 540-545). Anchorage, AK, 2022, doi.org/10.1109/ISIE51582.2022.9831669
- [16] Gehring J., Gosses K., Schwanninger R., Zeilmann B., Wunder B.: „Novel compensation scheme for low dynamic converters in droop-controlled DC grids“. IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2022, Kiel, doi.org/10.1109/PEDG54999.2022.9923315
- [17] Müller J., Letz S., Simon F.B., Bayer C.F., Schletz A., Görlich J., Nishimura T.: „Silver Sintering of Packaged GaN-Devices on Printed Circuit Board“. Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 19(1), 18-24, 2022, doi.org/10.4071/imaps.1675410

Erfindungsmeldungen, Patente 2022

- [1] Zhou Y.: Verfahren zum Ausbalancieren der Spannung in 4-Level Zwischenkreis für ZVS-Wechselrichter. Erfindungsmeldung
- [2] Zhou Y.: Verfahren für die Strommessung beim Nullspannungsschalten. Erfindungsmeldung
- [3] Amler A., Zhou Y.: Umrichter mit bauteilreduziertem Entlastungsnetzwerk für verlustarmes Schalten. Patentanmeldung
- [4] Amler A, et al: Optimierung eines Umrichters, Erfindungsmeldung
- [5] Amler A, et al: EMV-optimierte Ansteuerung eines Antriebsumrichters, Erfindungsmeldung
- [6] Zhou Y.: Verfahren und Topologie für drei Level-Umrichter, Erfindungsmeldung

Promotionen 2022

- [1] Ehrlich Stefan: Beiträge zur Modellbildung und Charakterisierung der Verluste induktiver Komponenten
- [2] Gerstner Michael: Untersuchung von Netzteilen mit großem Eingangsspannungsbereich
- [3] Geus Markus: Optimization of Li-Ion Battery Module Design in Terms of Spatial and Temporal Temperature Homogenization.
- [4] Strobl Christian: Verfeinerte Fehlerdetektion für Niederspannungs-Gleichstromnetze - Modellierung, Einflussgrößenanalyse und Identifikationsverfahren
- [5] Dicke Paul: Generischer Ansatz zur modularen Modellierung elektrochemischer Energiespeichersysteme

Abschlussarbeiten 2022

- [1] Meindl, Markus: Reverse Engineering des Wasserstoffsystems eines kommerziellen Brennstoffzellenfahrzeugs
- [2] Freundl, Patrizia: Entwicklung eines Regelungskonzepts für einen Gegentaktwandler im RF-Frequenzbereich
- [3] Qin, Yichun: Development of an Optimization Algorithm for Multi-Objective Optimization of Building Energy Infrastructure
- [4] Bayer, Florian: Untersuchung des dynamischen Ein-Widerstands von GaN-HEMT bei tiefen Temperaturen unter Berücksichtigung harter und weicher Schaltvorgänge
- [5] Song, Jiekun: Untersuchungen zur Implementierung von Droop-Regelungen bei zweistufiger Anbindung bidirektionaler Lasten an ein bipolares DC-Netz
- [6] Sauer, Adrian: Thermisches Management von Leistungselektronik über CFK-Strukturen in Multicoptern
- [7] Lehmeier, Thomas: Untersuchung spektral optimierter Steuerverfahren anhand eines Dreipunkt-Stromrichters am Gleichspannungszwischenkreis
- [8] Müller, Torsten: Design und Simulation der Regelung einer 4x3-phasigen 10 MW eMaschine mit je 3-fach interleaved taktenden Umrichter-Halbbrücken pro Phase
- [9] Schröder, Jacqueline: Bedarfsbezogene Standortwahl für die Ladeinfrastruktur im Großraum Erlangen
- [10] Sengpiel, Adrian: Echtzeitfähige Positionsbestimmung von Waren in der Intralogistik mittels UHF-RFID
- [11] Pauls, Denis: Analysis and design of an integrated single-stage on-board charger and DC/DC converter
- [12] Briegleb, Lukas: Entwicklung und Charakterisierung eines bidirektionalen hybriden Schutzschalters für DC-Anwendungen
- [13] Abbes, Mohamed Ali: Investigation into the interdependencies of metal and surface properties on the quality of wire bonds
- [14] Harmsen, Johannes: Analyse eines automobilen Brennstoffzellensystems und nutzerfreundliche Integration in eine Prüfstandsumgebung
- [15] Qiao, Chen: Betrachtungen zum Potential von Halbleiterbauelementen bei tiefen Temperaturen
- [16] Shenkermann, Gleb: Aktuelle und zukünftige Technologien für CO₂-neutrale Unternehmen
- [17] Linse, Andreas: Entwicklung eines aktiven Zwischenkreiskondensators
- [18] Fleischmann, Philipp: Untersuchung von Technologien für eine CO₂-neutrale Wärmeerzeugung
- [19] Tang, Yikai: Electro-thermal compact modelling of complex systems
- [20] Hiller, Alexander: Marktanalyse, technische Spezifikation und Erlösmodell für einen 48 V Grid-Manager
- [21] Pohlenz, Stephan: Untersuchung einer kaskadierten Regelung für einen LLC-Resonanzwandler
- [22] Zhihao, Zhao: Untersuchung und Verifizierung der Regelung eines ISOP-Systems für DC/DC Wandler
- [23] Bauer, Simon: Energieversorgungskonzepte für ein CO₂-neutrales Institut
- [24] Chen, Wie: Optimierungsmöglichkeiten für elektrische Antriebsmotoren in der Luftfahrt
- [25] Schwarz, Benedikt: Betrachtungen zu pareto-optimalen Pulsmustern für Dual-Active-Bridge-Konverter unter Berücksichtigung parasitärer Effekte
- [26] Zettelmeier, Julius: Untersuchung von Designoptionen für kryogene Leistungselektronik
- [27] Zürrlein, Tobias: Auslegung einer elektrischen Traktionsmaschine mit kombiniertem radialen und axialen magnetischen Fluss
- [28] Müller, Leonie Mara: Theoretische und simulative Analyse aktiver Common-Mode Filterkonzepte
- [29] Nistler, Eva: Untersuchungen zur modellprädiktiven Regelung eines vereinfachten Dreipunktstromrichters

FORSCHUNGSBEREICH

Energiemarktdesign



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Veronika Grimm
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

E-Mail
veronika.grimm@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 224

Web
www.encn.de/markt

ENERGIEMARKTDESIGN

Projektbericht 2022

Im Projekt befassten sich ein Team aus Ökonomen, Mathematikern und Juristen mit den wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Transformation des Energiesystems. Ziel war es, Methoden der Energiemarktmodellierung und die notwendigen mathematischen Algorithmen zu entwickeln sowie mit fundierten Analysen zum energiepolitischen Diskurs in Deutschland und Europa beizutragen. Mitarbeiter der FAU Erlangen-Nürnberg haben sich auch im Jahr 2022 an verschiedenen Veranstaltungen des EnCN mit Vorträgen und als Diskussionspartner beteiligt. Auch die Lehre an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg profitierte in hohem Maße von den Aktivitäten am EnCN. So wurde das Seminar Energiemärkte mit mehreren Praxispartnern am EnCN ausgerichtet und aus zahlreichen Einreichungen mit Themen zum Energiemarktdesign wurde die Masterarbeit von Ulrike Pfefferer und die Bachelorarbeit von Markus Albuscheit mit den EnCN-Energiepreis 2022 ausgezeichnet. Mit einer Förderung über den EnCN konnte, in Kooperation zwischen der FAU (Prof. Dr. Veronika Grimm) und der TH Nürnberg (Prof. Dr. Arno Dentel), eine Projektskizze für ein gemeinsames Forschungsprojekt zu energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für klimaneutrale Quartiere im urbanen Raum eingereicht werden, die sich aktuell noch in der Begutachtung befindet. Nachdem im Frühjahr 2022 die Förderung des Projekts Energiemarktdesign ausgelaufen ist, konnten einzelne Forschergruppen die Räumlichkeiten am EnCN weiterhin nutzen, um Forschungsvorhaben, in Kooperation mit anderen Akteuren am EnCN, abzuschließen. Dies ermöglichte mehrere Publikationen in hochrangigen internationalen Zeitschriften [1-7]. Wie bereits mit dem Abschlussbericht 2017-2021 für die zweite Förderphase dargelegt, hat der EnCN in den letzten Jahren seinem Ziel sehr erfolgreich Rechnung getragen, interdisziplinäre Spitzenforschung an den Schnittstellen zwischen Mathematik, Ökonomie und Ingenieurwissenschaften zu ermöglichen.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATORIN

Prof. Dr. Veronika Grimm

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Veronika.Grimm@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 224

Web
www.encn.de

Publikationen

1. Aigner, K.-M., R. Burlacu, F. Liers und A. Martin (2023). Solving AC optimal power flow with discrete decisions to global optimality. *INFORMS Journal on Computing*. Angenommen zur Veröffentlichung.
2. Aigner, K. M., J. P. Clarner, F. Liers und A. Martin. Robust approximation of chance constrained DC optimal power flow under decision-dependent uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 301(1), 318-333.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.051>
3. Ambrosius, M., J. Egerer, V. Grimm, A.H. van der Weijde. Risk aversion in multilevel electricity market models with different congestion pricing regimes. *Energy Economics* 105 (105701), <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105701>
4. Egerer, J., V. Grimm, J. Grübel und G. Zöttl. Long-run market equilibria in coupled energy sectors: A study of uniqueness, *European Journal of Operational Research* 303 (3), 1335-1354,
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.028>
5. Egerer, J., V. Grimm, K. Niazmand und P. Runge (2023). The economics of global green ammonia trade – Shipping Australian wind and sunshine to Germany. *Applied Energy*. Angenommen zur Veröffentlichung.
6. Grimm, V., C. Sölch und G. Zöttl. Emissions reduction in a second-best world: On the long-term effects of overlapping regulations, *Energy Economics* 109 (105829), <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105829>
7. Grimm, V., A. Martin, C. Sölch, M. Weibelzahl und G. Zöttl. Market-based Redispatch May Result in an Inefficient Dispatch. *Energy Journal* 43 (5). <http://doi.org/10.5547/01956574.43.5>
8. Runge, P., C. Sölch, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl und V. Grimm. Economic comparison of electric fuels produced at excellent locations for renewable energies: A scenario for 2035. Eingereicht zur Veröffentlichung

FORSCHUNGSBEREICH

Erneuerbare Energien



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Christoph Brabec

Friedrich-Alexander-Universität

Erlangen-Nürnberg

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

E-Mail

christoph.brabec@fau.de

Telefon

+49 9131 / 9398 100

Web

www.encn.de/EET

EE-Technologien im urbanen Umfeld - EET

Projektbericht 2022

Gebäude sind für ca. 40 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs und den damit verbundenen CO₂-Ausstoß verantwortlich, während regenerative Energieerzeugung oft fernab vom Verbraucher stattfindet. Das Ziel dieses Projekts besteht darin, innovative Technologien auf der Basis gedruckter Optoelektronik für die Erhöhung der Gebäudeeffizienz zur Verfügung zu stellen, die es ermöglichen, Energieverluste zu vermeiden bzw. Energie dort zu erzeugen, wo sie benötigt wird. Allein in Deutschland sind mehrere Hundert Quadratkilometer Fassadenfläche für die Integration von Photovoltaik (PV) geeignet, was urbane Bereiche zu Kraftwerken machen würde. Um diese bisher ungenutzten Flächen zu erschließen, werden in diesem Projekt die einzigartigen Eigenschaften der gedruckten Elektronik genutzt, um kostengünstige, optisch ansprechende und anpassungsfähige Alternativen für die gebäudeintegrierte PV zur Verfügung zu stellen, bspw. durch die Entwicklung transparenter PV-Module und deren monolithische Kombination mit schaltbaren gedruckten Fensterbeschichtungen.

Im **Projektteil TP1 – 2D und 3D Beschichtungstechnologien (Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf)** werden Beschichtungstechnologien für die Herstellung von PV-Modulen variabler Form, Farbe und Muster auf beliebigen Oberflächen entwickelt.

Im **Projektteil TP2 – zerstörungsfreie bildgebende Analyse (Dr. Thomas Heumüller, Prof. Dr. C. J. Brabec)** werden bildgebende optische Verfahren zur inline Qualitätskontrolle und zum Monitoring der Alterung von PV-Modulen entwickelt.

Im **Projektteil TP3 – smarte und schaltbare Fenster (Prof. Dr. Wolfgang Heiss)** werden smarte Materialien für die Herstellung spektral schaltbarer Fenster entwickelt, die dann im TP4 verdruckt und mit gedruckten PV-Modulen kombiniert werden.

Im **Projektteil TP4 – Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld (Dr. Andreas Distler, Priv.-Doz. Dr. H.-J. Egelhaaf, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden durch Kombination semitransparenter gedruckter PV-Module mit den schaltbaren Materialien aus TP3 elektrochrome und photovoltaisch aktive Fenster entwickelt.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR
Prof. Dr. Christoph J. Brabec

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung



E-Mail
Christoph.brabec@encn.de

Telefon
+49 9131 9398 100

Web
www.encn.de

1 2D- und 3D-Freiform Beschichtungsprozesse zur Herstellung von PV-Elementen für das urbane Umfeld

1.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: HI-ERN (ZAE-Kooperation)

Leitung: Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf (HI-ERN, FAU)

1.2 Arbeiten und Ergebnisse

1.2.1 Vollständig gedruckte organische Solarmodule mit Anoden und Kathoden aus Silbernanodrähten

Der herkömmliche Rolle-zu-Rolle-Druck von Solarmodulen erfolgt meist auf PET-Folie, auf die eine transparente Indiumzinnoxid (ITO)- oder IMI-Elektrode (Sandwich-Struktur aus ITO/Silber/ITO) aufgesputtert wurde. Ein entscheidender Vorteil der gedruckten Photovoltaik (PV) besteht jedoch darin, dass Solarmodule auf nahezu beliebige 2D oder 3D Oberflächen aufgebracht werden können. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist aber, dass auch die aufgesputterte Metalloxid-Elektrode durch eine gedruckte transparente Elektrode ersetzt werden kann.

In der Doktorarbeit von Eric Tam (FAU, 2022) wurde dies erreicht, indem auch die unteren Elektroden aus Silbernanodrähten (silver nanowires – AgNW) hergestellt wurden, wie bislang schon die oberen Elektroden (Abbildung 1). Dazu waren mehrere Herausforderungen zu bewältigen.[5]

Zum einen verursachen untere Elektroden aus AgNW häufig Kurzschlüsse mit der oberen Elektrode, da einzelne der ca. 30 μm langen Silbernanodrähte die nur wenige Hundert Nanometer dicke Aktivschicht durchstoßen. Diese Kurzschlussbildung konnte durch Erhöhung der Schichtdicke der Elektronentransportschicht aus Zinkoxid (ZnO)-Nanopartikeln weitgehend eliminiert werden, ohne dadurch den seriellen Widerstand der Zellen zu erhöhen.

Eine weitere Herausforderung stellte die serielle Verschaltung der einzelnen Solarzellen zum Solarmodul dar. Um den seriellen Widerstand des Moduls so gering wie möglich zu halten, ist die Herstellung eines guten elektrischen Kontakts zwischen der oberen Elektrode einer jeden Solarzelle des Moduls und der unteren Elektrode ihrer Nachbarzelle essentiell (Abbildung 1). Dies ist bei Kontakten zwischen oberen Elektroden aus AgNW und unteren Elektroden aus ITO aufgrund der flächigen Natur letzterer fast immer gewährleistet (Abbildung 1 oben). Bestehen jedoch beide Elektroden aus AgNW, wird der Serienwiderstand durch die Anzahl der Kontakte zwischen den AgNW der oberen und unteren Elektrode bestimmt. Um den Kontaktwiderstand zu minimieren, wurden einerseits verschiedene Formulierungen der AgNW-Tinten getestet und andererseits die Laserstrukturierung der P2-Linie optimiert (Abbildung 1 links).

Hinsichtlich der Tintenformulierungen zeigte sich, dass solche Tinten ungeeignet sind, die Polymere als Binder zur Verbesserung der Druckeigenschaften enthalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich Binderpolymer und AgNW während des Trocknungsprozesses separieren und das Binderpolymer eine elektrisch isolierende Schicht auf der unteren AgNW-Elektrode bildet (Abbildung 1 Mitte). Um diesen Effekt auszuschalten, wurde ein Beschichtungsprozess entwickelt, der eine Tintenformulierung ohne Binderpolymer verwendet (Abbildung 1 unten).

Die Verschaltung der Zellen zum Modul erfordert die Öffnung einer P2-Linie in der zunächst vollflächigen Aktivschicht mittels Laserablation (Abbildung 1 links). Die Herausforderung besteht nun darin, Laserparameter (Pulsenergie, -frequenz und -überlapp) zu finden, mit denen die Aktivschicht zwar weitgehend entfernt wird, aber die darunterliegende AgNW zumindest teilweise erhalten bleiben, um einen hinreichenden elektrischen Kontakt mit den AgNW der oberen Elektrode der Nachbarzelle zu erzielen. Da die Ablationsschwellen von AgNW und Aktivschicht nahe beieinander liegen, ist das Prozessfenster sehr schmal. Dennoch konnte durch Variation der Breite der P2-Linie (Abbildung 2) der Kontaktwiderstand auf weniger als 0.1 Ohm reduziert werden (Tabelle 1) und somit eine Limitierung der Modul-Leistung durch den sog. Interconnect-Widerstand zwischen benachbarten Zellen vermieden werden.

Abbildung 3 zeigt die resultierenden vollständig gedruckten organischen Solarmodule mit ihren jeweiligen Stromdichte-Spannungs-Charakteristiken. Die Effizienzen der Solarmodule sind mit denen der auf IMI-Elektroden gedruckten Module vergleichbar. Da sowohl die obere als auch die untere AgNW-Elektrode optische Transmissionen von ca. 90% aufweisen, erscheinen die Solarmodule je nach optischer Dichte der Aktivschichten mehr oder weniger semitransparent.

Kooperationen

Kooperationen hinsichtlich vollständig gedruckter Solarzellen mit unterer und oberer Elektrode aus AgNW bestehen mit den Firmen HeiQ RAS AG und Enerthing GmbH im Rahmen des ZIM-Projekts „OPV4IoT“ (FKZ 16KN098427).

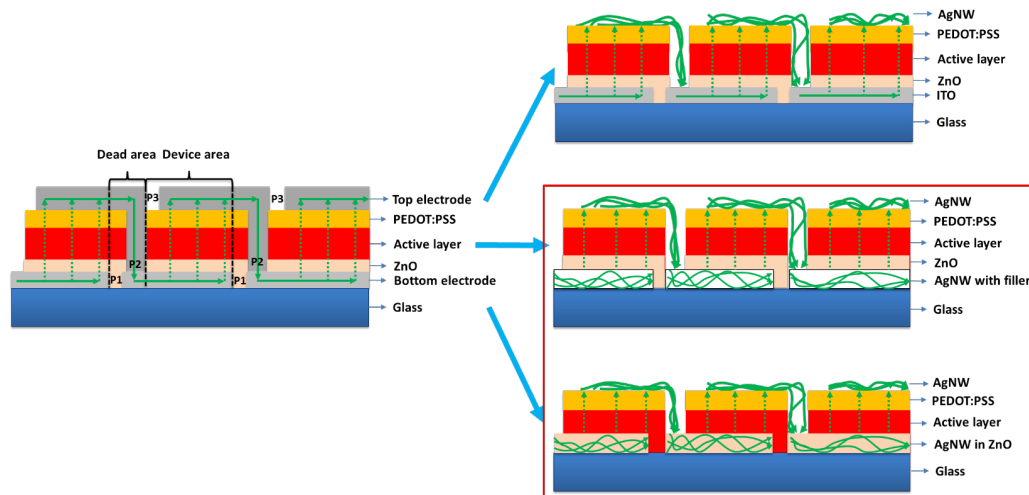


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines gedruckten Solarmoduls aus drei seriell verschalteten Solarzellen (AgNW – Silbernanodrähte, PEDOT:PSS – Lochtransportschicht, Active Layer – organisches Halbleitergemisch als Aktivschicht, ZnO – Elektronentransportschicht aus Zinkoxid-Nanopartikeln). Links: Laserablationslinien P1 – P3 zur Herstellung der seriellen Verschaltung, resultierend in einem Photostrom-generierenden Bereich (ca. 98% der Modulfläche) und einem „Interconnect“-Bereich („dead area“, ca. 2% der Modulfläche). Rechts, von oben nach unten: transparente Elektrode aus Indiumzinnoxid (ITO), AgNW mit polymerem Binder und AgNW ohne Binder als untere Elektrode).

Tabelle 1: Kontaktwiderstände R_c und spezifische Widerstände p_c der Interconnects in Abbildung 2. Flächenwiderstände von unterer und oberer Elektrode betragen $12 \Omega/\square$ bzw. $6 \Omega/\square$.

Interconnect- Breite	70 μm		100 μm		140 μm	
	$R_c (\Omega)$	$p_c (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_c (\Omega)$	$p_c (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_c (\Omega)$	$p_c (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
	0.95	1.76×10^{-03}	0.13	3.30×10^{-04}	0.055	2.06×10^{-04}

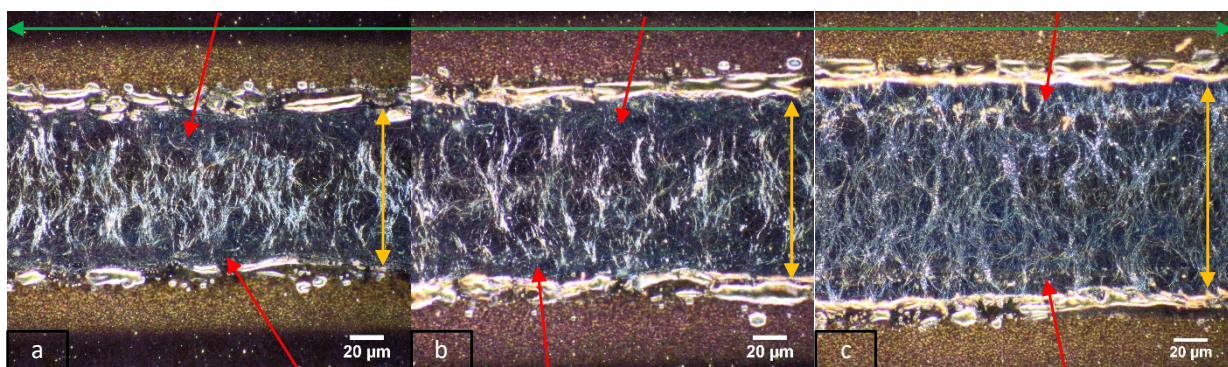


Abbildung 2: Dunkelfeld-Mikroskopaufnahmen von Interconnects unterschiedlicher Breite (orange Pfeile) nach Laserablation der P2-Linie (v.l.n.r. 70 μm , 100 μm , and 140 μm , s. Tabelle 1). Rote Pfeile deuten auf durch die Laserablation zerstörte Bereiche der AgNW-Elektrode.

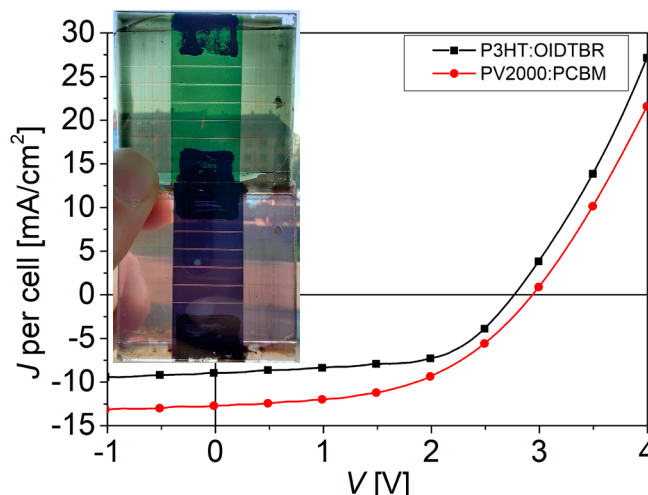


Abbildung 3: Vollständig gedruckte semitransparente organische Solarmodule aus jeweils vier seriell verschalteten Zellen auf der Basis zweier unterschiedlicher Materialsysteme mit ihren jeweiligen Stromdichte-Spannungs-Kurven unter Beleuchtung bei AM1.5-Bedingungen. Sowohl die oberen als auch die unteren transparenten Elektroden bestehen aus Silbernanodrähten.

Ausblick

Die Ergebnisse der Doktorarbeit fließen in verschiedene Entwicklungen der „Solarfabrik der Zukunft“ ein, die darauf abzielen, neue Anwendungsfelder für die gedruckte PV zu erschließen. Als Beispiel sei die Entwicklung ultraleichter Solarmodule für die Luft- und Raumfahrt genannt,[3] bei denen auf die PET-Folie mit aufgesputterter IMI-Elektrode verzichtet werden kann, indem die AgNW-Elektrode auf eine der beiden Barrierefolien für die Verkapselung des Moduls gedruckt wird, was eine Gewichtsersparnis von ca. 30% bedeutet.

1.2.2 Rolle-zu-Rolle-Entgratung laserstrukturierter Elektroden für gedruckte Solarmodule mittels CO₂-Schneestrahls-Verfahrens

Die notwendige Laserstrukturierung der Frontelektrode in hocheffizienten gedruckten Solarmodulen hat zur Folge, dass sich entlang der Strukturierungskanten leitfähige Grate (engl. „burrs“) bis zu einer Höhe von 2-3 μm aufstellen (Abbildung 4a). Wegen der geringen Schichtdicke ($< 1 \mu\text{m}$) der aktiven Schicht in organischen und Perowskit-basierten Solarzellen führt dies zu Kurzschlüssen zwischen Front- und Rückelektrode, die im Wärmebild (Dark Lock In Thermography - DLIT) des Solarmoduls unter Rückwärtsspannung als helle Stellen erkennbar sind (Abbildung 5d) und dessen Effizienz drastisch verringern, v.a. durch einen reduzierten Füllfaktor (Abbildung 5b). Die Beseitigung der Grate wird in der (Pilot-)Produktion bisher unter hohem Personalaufwand mechanisch durchgeführt. Um eine wirtschaftliche Serienproduktion zu ermöglichen, wurde im Rahmen des ZIM-Projekts „PV-CO₂“ ein vollautomatisiertes CO₂-Schneestrahls-Reinigungssystem entwickelt (Abbildung 4b,c), welches die Grate effizient und kostengünstig in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren abtragen kann. Im Jahresbericht 2021 wurde bereits die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens demonstriert. Der Prozess wurde nun auf 30 cm Breite und eine Vorschubgeschwindigkeit von min. 2 m/min aufskaliert, um ihn vollends industrietauglich zu machen.

Dazu wurden zunächst die CO₂-Strahlparameter optimiert. Mit diesen Parametern wurde anschließend die Breite ermittelt, auf der eine einzelne Düse die laserstrukturierte Elektrode im R2R-Betrieb reinigen kann (Abbildung 5a). Daraus ergibt sich die Anzahl der Düsen, die für die Reinigung einer Folie bestimmter Breite nebeneinandergeschaltet werden müssen. Um die Industrietauglichkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wurde eine Batterie von drei Düsen in die R2R-Anlage der „Solarfabrik der Zukunft“ eingebaut (Abbildung 4c), was für die Entfernung der Grate auf einer Breite von 15 cm ausreichend ist. Die mit dieser Anordnung hergestellten Solarmodule zeigen nur wenige Kurzschlüsse im Wärmebild (Abbildung 5e,f) und weisen eine Effizienz auf, die die der handgereinigten Module noch übersteigt (Abbildung 5b,c), vermutlich aufgrund der geringeren Beschädigung der nichtstrukturierten Bereiche der Elektrode durch das schonendere CO₂-Strahlverfahren.

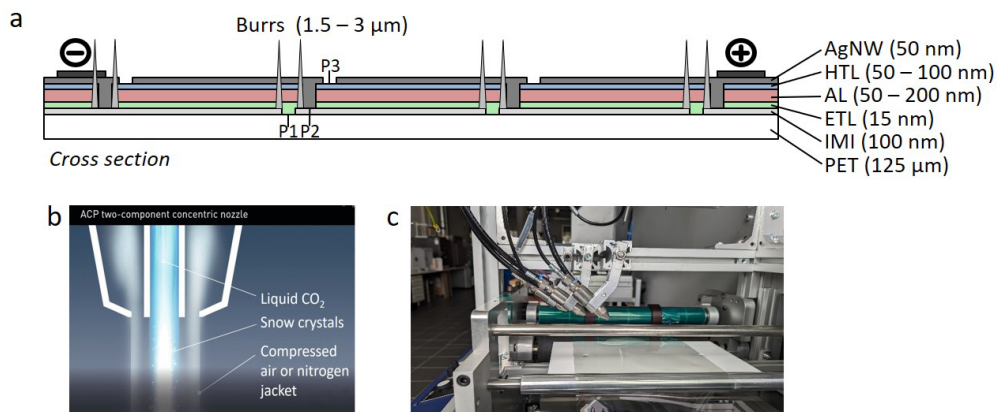


Abbildung 4: a) Durch Laserstrukturierung (P1) der transparenten Metalloxid/Silber/Metalloxid-Elektrode (IMI) auf PET-Folie entstandene Grate („burrs“) in einem gedruckten Solarmodul (ETL – Elektronentransportschicht, AL – aktive Schicht, HTL – Lochtransportschicht, AgNW – Silbernanodrahtelektrode). b) Schematische Darstellung des CO₂-Schneestrahls-Prozesses. c) Batterie von CO₂-Schneestrahldüsen in der Rolle-zu-Rolle-Anlage der „Solarfabrik der Zukunft“.

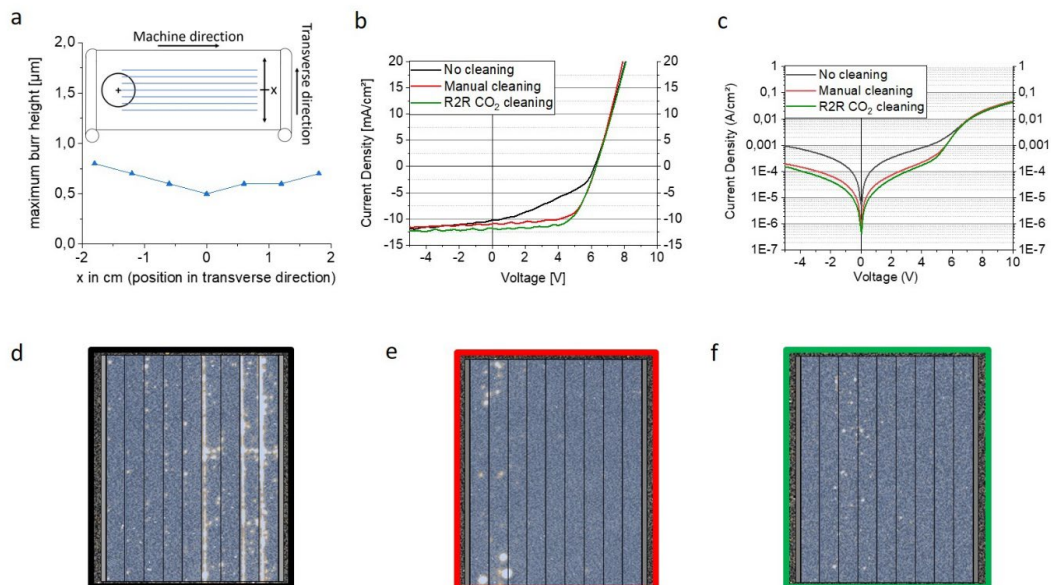


Abbildung 5: a) Höhe der Grate nach CO₂-Schneestrahlsbehandlung als Funktion des seitlichen Abstands von der Düse. b), c): Hell- und Dunkel-Strom-Spannungskurven organischer Solarmodule ohne Entfernung der Grate sowie nach manueller Reinigung und CO₂-Schneestrahls-Reinigung. d)-f): Wärmebilder (DLIT) der Solarmodule unter Rückwärtsspannung vor (d) sowie nach manueller (e) bzw. CO₂-Strahlreinigung (f).

Damit wurde ein Verfahren zur schnellen und zuverlässigen Entgratung laserstrukturierter Elektroden entwickelt, das nicht nur in der gedruckten Photovoltaik zu einer erheblichen Beschleunigung der Fertigungsverfahren beitragen wird.

Kooperationen

Die Resultate wurden im Rahmen des ZIM-Projekts „PV-CO₂“ (KK509400GM1) in Kooperation mit den Firmen Sciprios GmbH und acp systems AG erzielt.

Ausblick

Die entwickelte Apparatur wird von den o.g. Firmen vermarktet. Ein Exemplar wird in die Rolle-zu-Rolle-Fertigungsanlage der „Solarfabrik der Zukunft“ am EnCN integriert, um deren Durchsatz weiter zu erhöhen.

2 Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse

2.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Dr. Thomas Heumüller (FAU), Prof. Dr. Christoph J. Brabec (FAU)

2.2 Defektanalyse zur Vorhersage von Effizienz und Stabilität

Im Rahmen des EET Projekts werden neue Beschichtungsverfahren entwickelt, mit denen fassadenintegrierte PV-Installationen im urbanen Umfeld umgesetzt werden. Mit hochauflösender Photolumineszenz (PL) und Elektrolumineszenz (EL) wurde eine erfolgreiche Qualitätskontrolle entwickelt, die auch bei den Modulen aus TP1 zum Einsatz kommt.

Mit der erfolgreichen Entwicklung und Umsetzung von Methoden zur Qualitätskontrolle und detaillierten Analyse von Schichten in neuartigen Druckprozessen rückt eine Optimierung der Schichtzusammensetzung durch neuartige Tintenformulierungen in den Vordergrund. Neben roboterbasierten Hochdurchsatzmethoden zur Filmherstellung mit Dropcasting, mit denen bis zu 1000 Filme unterschiedlicher Zusammensetzung an einem Tag getestet werden können, wurden insbesondere auch Methoden des maschinellen Lernens zur Optimierung komplexer Systeme eingesetzt.

Um die Stabilität einer großen Anzahl an Proben untersuchen zu können, wurden Verfahren zur beschleunigten Alterung entwickelt (Abbildung 6). Insbesondere ein Setup zur Messung unter bis zu 300 Sonnen konzentrierter Lichtintensität mit präziser Temperaturkontrolle durch einen in der Solarzellherstellung aufgedampften Temperatursensor wurde eingesetzt. Des Weiteren werden zur Bereitstellung einer breiten Datenlage für maschinelles Lernen in-situ Messungen während der Alterung durchgeführt. Zusätzlich zu den erfolgreich entwickelten bildgebenden Verfahren werden wertvolle Informationen über Ladungsträgerlebensdauern aus der transienten Photospannung (TPV) und über Ladungsträgerdichten aus Ladungsextraktionsmessungen (CE) bestimmt. Diese Messungen können in einem voll integrierten Setup in-situ während der Degradation gemessen werden. Dadurch lassen sich über die Zeitverläufe der physikalischen Parameter Degradationsmechanismen identifizieren und mit Drift-Diffusions Simulationen modellieren.

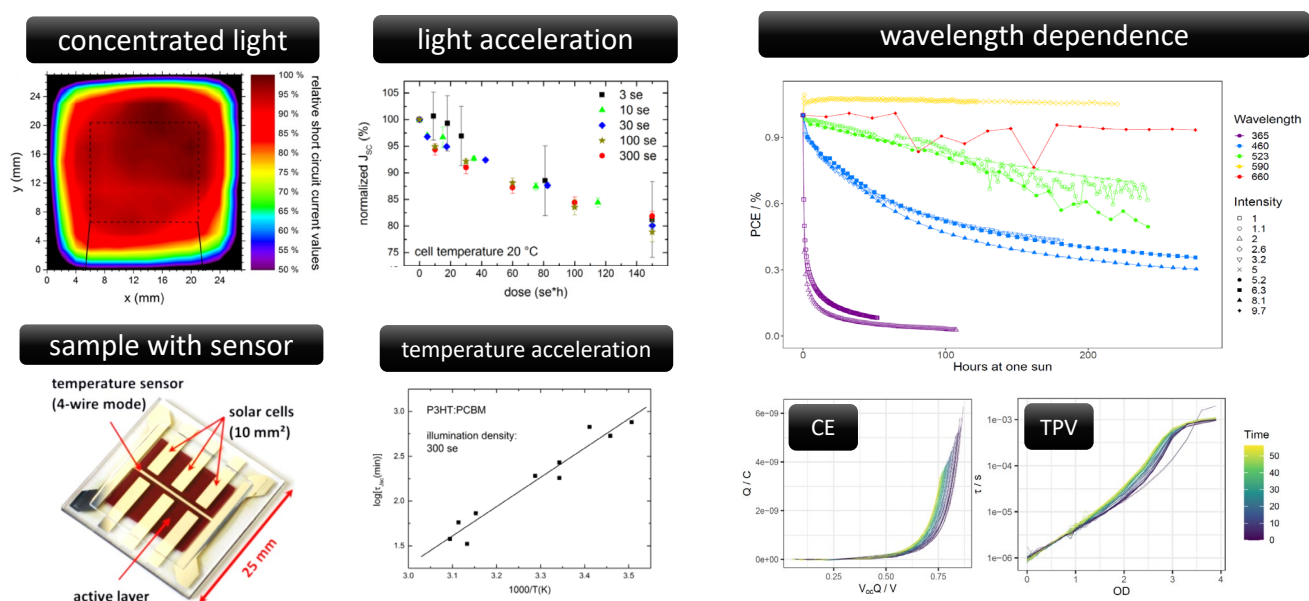


Abbildung 6: Zur Untersuchung einer großen Probenzahl werden beschleunigte Verfahren eingesetzt. Konzentriertes Licht von bis zu 300 Sonnen Äquivalenten führt zu einer linearen Beschleunigung der Degradationseffekte bei konstanter Temperatur. Eine präzise Temperaturkontrolle ist durch einen eigens entwickelten resistiven Sensor direkt innerhalb der Solarzelle möglich. Bei Erhöhung der Temperatur folgt die Degradation einem Arrhenius Verhalten. Insbesondere Wellenlängen abhängige Messungen ermöglichen

zusätzliche Informationen zur Bestimmung verschiedener Degradationsmechanismen. In-situ Messung der Ladungsträgerdichte (CE) und Ladungsträgerlebensdauer (TPV) liefern zentrale Daten zur Auswertung mit Methoden des Maschinellen Lernens. [7,10]

2.3 Ausblick

Die in TP2 entwickelten Charakterisierungsmethoden können effizient in der Herstellung von organischen Solarzellen eingesetzt werden. Unter Verwendung von Tools zur Analyse von Big Data können in der Zukunft Muster in den Daten gefunden werden, die nicht nur bei der Qualitätskontrolle und Optimierung helfen, sondern grundlegende physikalische Zusammenhänge in Bezug auf Effizienz und Stabilität erkennen lassen.

3 Smarte und schaltbare Fenster

3.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Wolfgang Heiss (FAU)

3.2 Arbeiten und Ergebnisse

Die Funktion von elektrochromen Fenstern beruht meist auf Reduktions- Oxidationsreaktionen in einem Bauteil, das dem Aufbau nach dem einer Batterie ähnelt, mit der zusätzlichen Komplikation, dass sämtliche Komponenten dieses Bauteils entweder transparent sein müssen, oder eben den gewünschten elektrochromen Effekt aufweisen sollen. Während für die Reduktions- Oxidationsreaktionen eigentlich eine Vielzahl von Molekülen und anderen Komponenten in Frage kommen, sind es eher wenige Materialien, die das gewünschte Schaltverhalten der optischen Eigenschaften zwischen transparent und einer Farbe gewährleisten, die für das menschliche Auge in einem Fenster als angenehm empfunden wird. Das schränkt die verwendbaren elektrochromen Materialien, die in einem Fenster verwendet werden können erheblich ein. Sollen neben den Effekten im sichtbaren Spektralbereich auch noch schaltbares Verhalten für Wärmestrahlung, also infrarotes Licht, erzielt werden, so bleiben nur mehr wenige Komponenten übrig, die hier potentiell Anwendung finden können. Darunter findet man vor allem dotierte Metall-Oxide, wie das Wolfram-Oxid oder Indium-Zinn-Oxid, welche in diesem Projekt in den letzten Jahren auch untersucht worden sind. Ein Problem dieser Materialien ist der Preis, bzw. die fehlende Verfügbarkeit dieser Materialien, da sie auch relativ seltene Metalle wie das Indium enthalten. In diesem EET Projekt haben wir deshalb auch nach kostengünstigen Alternativen gesucht, Metalloxide mit plasmonischen Eigenschaften, welche mittels Einbringen von Fremdatomen (Dotierung) als auch über Reduktion und Oxidation verändert werden können. Als kostengünstiges Material wurde von Antimon dotiertes Zinn Oxid (ATO) eingeführt, für welches auch ein Schaltverhalten der optischen Eigenschaften gezeigt werden konnte. Was genau gezeigt worden ist, war der Effekt des Aufbringens von Ligandenmolekülen mit unterschiedlichen Elektronen Aufnehmenden oder Abgebenden Wirkungen. Interessanterweise wurde hier ein Antimon basierender Ligand gefunden, der dabei den größtmöglichen Effekt zeigte. Was es noch zu zeigen galt, war ob diese Liganden vornehmlich als Elektronenakzeptoren oder als Elektronendonatoren wirkten. Das könnte aus dem Oxidationsgrad des Liganden bestimmt werden. Um diesen zu bestimmen, wurden in Zusammenarbeit mit der Johannes-Kepler-Universität in Linz röntgenphotoelektronen-spektroskopische Messungen durchgeführt und mit Hilfe von tabulierten Daten interpretiert (Abbildung 7). Während in der Literatur oft Aussagen über den Oxidationsgrad des Antimons (3+ oder 5+) aufgrund von ähnlichen Spektren, wie in Figure X gezeigt, gemacht worden sind, kommen wir zu dem Schluss, dass die gegebenen Ergebnisse eine solche Analyse gar nicht zu lassen, weil die dafür notwendigen spektralen Hinweise sich gar nicht eindeutig auflösen lassen. Deshalb sind unsere Beschreibungen der Effekte der Plasmonresonanzen in Antimon dotierten Zinnoxid weiterhin indirekt, aber zumindest nicht falsch, so wie in einigen bisherigen wissenschaftlichen Publikationen.

Neben der Suche nach kostengünstigen Alternativen für elektrochrome Fenster arbeiten wir auch mit Nanokristallen aus Wolframoxid. Besonderes Augenmerk bei diesen Arbeiten liegt dabei auf der Entwicklung von Bauteilen basierend auf Folien, mit denen gegebenenfalls Gebäude auch nachgerüstet werden können. Diese Entwicklungen zeigen, dass die

üblicherweise auf Glassubstraten entwickelten Konzepte und Bauteilarchitekturen nicht direkt auf Folie übertragen werden können. Mitverantwortlich dafür ist der Umstand, dass die kommerziellen transparenten Kontaktschichten der

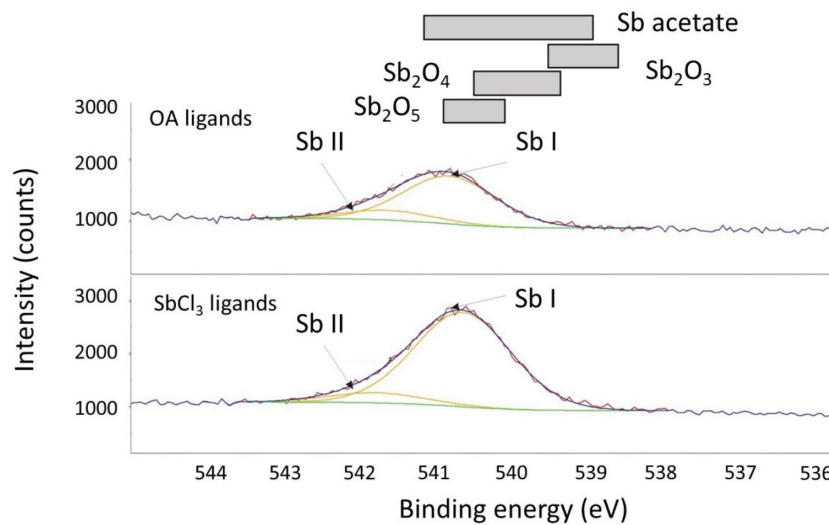


Abbildung 7: Röntgen-Photoelektron-Spektren von Nanokristallen aus Antimon dotiertem Zinnoxid mit einem Antimongehalt von 20%. Die Spektren wurden vor und nach einem Ligandenaustausch mit Antimon-(Sb) Chlorid aufgenommen. Eine Zunahme des Antimon Gehaltes kann hier abgelesen werden, aber nicht in welchem Oxidationszustand sich die Antimon-Ionen befinden.

Bauteile auf Folien nicht die gleich günstigen Eigenschaften aufweisen wie auf Gläsern. Das führt dazu, dass diese Kontaktschichten mit weiteren Nanokristallschichten verbessert werden müssen, was zumindest deren elektrische Leitfähigkeit betrifft. Dies wiederum hat eine negative Auswirkung auf die Stabilität der elektrochromen Folien, was wiederum ein erhebliches Problem bei deren Kommerzialisierung darstellt. Bei Folien ist es auch ein erheblich größeres Problem, den Abstand zwischen den großflächigen Elektroden der Bauteile genau einzustellen. Während dies bei kleinen Bauteilen einfach gelingt, spielt dieses Problem bei größeren Bauteilen eine erhebliche Rolle.

3.3 Ausblick

Die Aufskalierung der Folienbauteile in den industriellen Maßstab wird im Rahmen eines EXIST Gründerstipendiumsprojekts erfolgen, das Ende 2022 bewilligt wurde.

4 Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld

4.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Christoph Brabec (FAU, HI-ERN), Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf (HI-ERN, FAU), Dr. Andreas Distler (FAU)

4.2 Entwicklung eines elektrochromen und photovoltaisch aktiven Hybridbauteils

In Kooperation mit TP3 (Prof. Wolfgang Heiß) wurde dieses Projekt im Rahmen einer Masterarbeit unter Anleitung von Dr. Andreas Distler durchgeführt.

Die Arbeiten dieses Projekts zielten auf eine in transparente Gebäudefassaden integrierte Anwendung ab, welche einfallende Sonnenenergie in Strom umwandelt und zusätzlich schaltbar für Verschattung/Abdunklung sorgen kann; eine hochinteressante Kombination für Gebäude mit großen Glasfassaden und ihre Energieeffizienz. Ziel war es ein optoelektronisches Hybridbauteil zu entwickeln, welches photovoltaische Eigenschaften (d.h. es wandelt Licht in Elektrizität um) und elektrochrome Eigenschaften (d.h. es ändert die Farbe/Transparenz, wenn Spannung angelegt wird) kombiniert. Es mussten zunächst die einzelnen Komponenten des Bauteils sowohl elektrisch als auch optisch mit Hinblick auf eine Kombination optimiert werden, so dass einerseits die Stromausbeute maximiert wird und andererseits eine möglichst hohe Lichtdurchlässigkeit im einen Schaltzustand und eine möglichst niedrige Lichtdurchlässigkeit im anderen Schaltzustand vorhanden ist. Anschließend wurde eine Lösung für die Fusion der beiden Einzelkomponenten erarbeitet.

Das organische Photovoltaikmodul (OPV) wurde mit Hilfe einer Kombination aus Rakelbeschichtung aus Lösung, Strukturierung mit einem Laser und Aufdampfen einer Metallelektrode hergestellt. Die Optimierungen haben ein Modul-Layout mit einer Verschaltung von fünf Solarzellen in Serie ergeben, wodurch das OPV-Modul die nötige Spannung zum Betreiben des elektrochromen Bauteils (ECD) liefert (~3 V). Für die photoaktive Schicht wurden organische Materialien ausgewählt, welche vorwiegend lange Wellenlängen (600-900 nm) absorbieren und somit eine besonders hohe Lichtdurchlässigkeit im für das Auge empfindlichen Spektralbereich (500-630 nm) aufweisen. Dadurch besitzt das OPV-Modul im Durchlicht eine hellblaue Farbe. Die aufgedampfte Metallelektrode besteht aus ultradünnem Gold und Silber, wodurch sie eine hohe Transparenz aufweist.

Das elektrochrome Bauteil (ECD) hat zwei mit Indiumzinnoxid(ITO)-beschichtete Gläser als Elektroden, zwischen denen sich ein π -konjugiertes Polymer als elektrochromes Material und ein Flüssigelektrolyt auf Lithiumionenbasis befinden. Das Material und die Dicke der Polymerschicht wurde so optimiert, dass der Unterschied der mit dem menschlichen Auge wahrgenommenen Lichtdurchlässigkeit zwischen den beiden Schaltzuständen maximal ist. Das ECD ist im lichtdurchlässigen Zustand volltransparent (farblos) und im abgedunkelten Zustand tiefrot. Das Material und die Dicke der Elektrolytschicht wurden im Hinblick auf eine maximale Schaltgeschwindigkeit (~10 s) optimiert.

Bei der Kombination der beiden Einzelkomponenten wurde das ECD als Deckglas für die Verkapselung der OPV genutzt. Unter Verwendung eines Spezialklebers ist somit die OPV vor äußeren Einflüssen wie Sauerstoff und Luftfeuchtigkeit geschützt. Der finale Schichtaufbau des zusammengesetzten ECD-OPV-Hybridbauteils ist in Abbildung 8a dargestellt und die dazugehörigen Transmissionsspektren beider Schaltzustände sind in Abbildung 8b gezeigt. Zuletzt wurde eine Flächenskalierung der Technologie durchgeführt und so ein Demonstrator eines ECD-OPV-Hybridmoduls mit 5 cm x 5 cm Aktivfläche realisiert. Dieser Demonstrator lässt sich bereits unter Schwachlichtverhältnissen mittels integriertem Schalter energieautark hell und dunkel schalten. Fotos des Demonstrators in beiden Schaltzuständen sind in Abbildung 8c+d zu sehen.

4.3 Kooperationen

Im Rahmen der strukturfördernden Verbundprojekte des EnCN hat die „Solarfabrik der Zukunft“ gemeinsam mit den beiden EnCN-Arbeitsgruppen „Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien“ (FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften WW6, Prof. Wolfgang Heiß) und „Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik“ (THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Prof. Arno Dentel) und der Forschungsgruppe „Konstruktion und Technik“ (THN, Fakultät Architektur, Prof. Roland Krippner) das Projekt „Organische Photovoltaik-Folien mit schaltbarer Transparenz für Fenster und Glasfassaden energieeffizienter Gebäude“ (OPVplus) bearbeitet. Innerhalb des Vernetzungsprojektes wurde die experimentelle Grundlage zur Beantragung eines öffentlichen Förderprojekts bei einem Drittmittelgeber geschaffen. Technischer Inhalt des Projekts ist die Entwicklung einer Hybrid-Optoelektronik, welche die Funktionalitäten schaltbar abdunkelnd (elektrochrom) und stromerzeugend (photovoltaisch) vereint, und die Untersuchung und Optimierung des Potenzials eines solchen Systems für die Energieerzeugung, den Komfortgewinn und die Energieeinsparung von Gebäuden.

4.4 Ausblick

Die Ergebnisse des strukturfördernden Verbundprojekts „OPVplus“ wurden genutzt, um einen Projektantrag zu einem gleichnamigen öffentlichen Förderprojekt zu erstellen, welcher im Frühjahr 2023 im Rahmen des Innovationsprogramms „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen eingereicht wird.

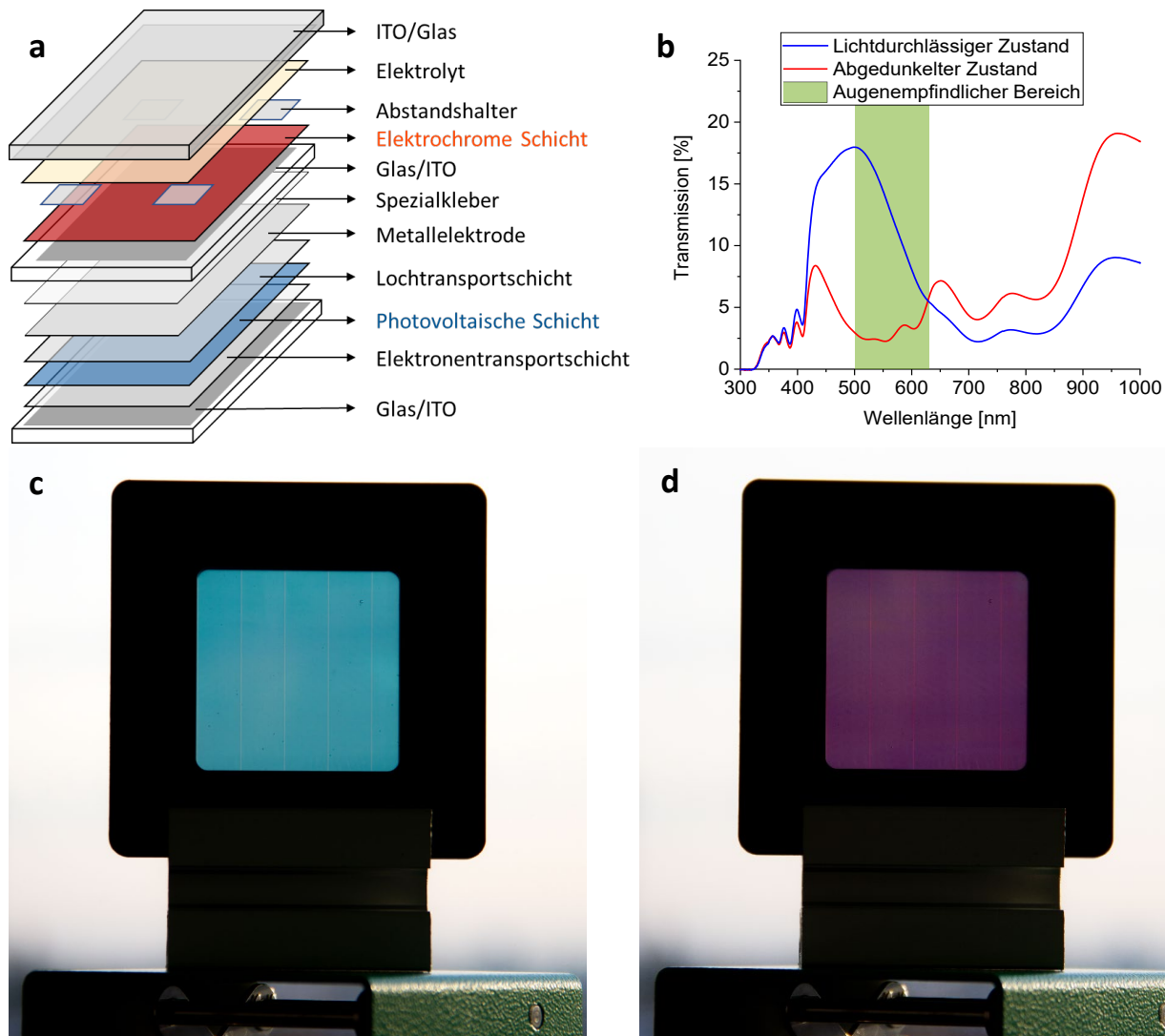


Abbildung 8: a) Schichtaufbau des neuentwickelten ECD-OPV-Hybridbauteils. b) UV/Vis-Transmissionsspektrum des Hybridbauteils im abgedunkelten (rot) und im lichtdurchlässigen (blau) Schaltzustand. Der augenempfindliche Spektralbereich ist grün hinterlegt. c) Finaler ECD-OPV-Hybridmodul-Demonstrator im lichtdurchlässigen Zustand. d) Demonstrator im abgedunkelten Zustand.

5 Schlussworte

Die Teilprojekte des Projekts EET haben auch in diesem Jahr dazu beigetragen, das Potential des urbanen Bereichs als Energieerzeuger zu aktivieren. Im Teilprojekt 1 wurde ein vollständig gedrucktes organisches Solarmodul entwickelt, dessen beide Elektroden aus Silbernanodrähten bestehen, wodurch es ermöglicht wird, semitransparente PV-Module in nahezu beliebiger Form auf nahezu beliebige Unterlagen zu drucken. Außerdem wurde in Kooperation mit zwei Maschinenbauunternehmen (darunter die Ausgründung Sciprios GmbH) ein Rolle-zu-Rolle-Reinigungsverfahren zur Entgratung von Metalloxid-Elektroden entwickelt, das sowohl Produktionsgeschwindigkeit als auch -ausbeute gedruckter PV-Module erheblich steigert. Die in Teilprojekt 2 entwickelten bildgebenden Messverfahren ermöglichen es unter Einsatz Künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen, einerseits eine zuverlässige Qualitätskontrolle der in TP1 entwickelten Rolle-zu-Rolle-Prozesse zu etablieren und andererseits beschleunigte Alterungsprozesse der Module in-situ zu verfolgen, was entscheidend zur Verlängerung der Modul-Lebensdauern beiträgt. In Teilprojekt 3 wurden skalierbare Materialien und Prozesse entwickelt, um durch Beschichtung von Glas mit Nanopartikel-Suspensionen schaltbare Fenster herzustellen, die für die Erhöhung der Gebäudeeffizienz, speziell in Bürogebäuden, eine zentrale Rolle spielen. Für die Aufskalierung der Technologie in den industriellen Maßstab konnte ein EXIST Gründerstipendium gewonnen werden. In Teilprojekt 4 wurden durch Kombination gedruckter semitransparenter PV-Module mit den in TP3 entwickelten schaltbaren Materialien elektrochrome und photovoltaisch aktive Hybridbauteile für die Integration in Fenster entwickelt, die sowohl der Energieeinsparung als auch der Elektrizitätsgewinnung dienen. Dieses Projekt wurde gemeinsam mit zwei Arbeitsgruppen der THN durchgeführt und vom EnCN im Rahmen der strukturfördernden Verbundprojekte unterstützt. Ein Förderantrag „OPVplus“ durch das Programm „Zukunft Bau“ zur Weiterverfolgung dieser Thematik wird eingereicht.

Die Aktivierung von Fensterflächen für Energieeinsparung und Elektrizitätserzeugung wird auch weiterhin im Fokus unserer Aktivitäten stehen. Dies wird u.a. im Rahmen des o.g. Gründerstipendiums und ggf. des Projekts OPVplus sowie des EU-Projekts „Citysolar“ der FAU erfolgen.

6 Vorträge & Poster 2022

- [1] M. Gusetu. Surface Modification of Perovskites Using a Series of Different SAM Materials. Hausseminar des i-MEET, 2022
- [2] T. Du. Additive-free, Low-temperature Crystallization of Stable α -FAPbI₃ Perovskite. International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, 2022
- [3] A. Distler. Gedruckte Photovoltaik und deren Anwendungsfelder. Lange Nacht der Wissenschaften, 2022
- [4] L. Dong. Minimalistic interface requirement for fully printable perovskite solar cells and modules enabled by a dipole layer. NEXT-GEN V+ PV materials, 2022
- [5] M. Steinberger. All Inkjet-printed Organic Solar Cells on Curved Surfaces of 3D Objects. Advanced Materials Congress, 2022
- [6] J. Wachsmuth. Routes to highly efficient fully solution-processed printed Organic Solar Cells: Materials and Challenges. Hausseminar des i-MEET, 2022
- [7] L. Dong. Fullerene-enabled interface engineering in fully printed perovskite solar cells and modules. Hausseminar des i-MEET, 2022
- [8] R. Basu. Aerosol Jet Printed Barriers for Organic Photovoltaics. Hausseminar des i-MEET, 2022

7 Veröffentlichungen 2022

- [1] G. Zhang, F.R. Lin, F. Qi, T. Heumüller, A. Distler, H.-J. Egelhaaf, N. Li, Ph.C.Y. Chow, C.J. Brabec, A.K.-Y. Jen, H.-L. Yip. Renewed prospects for organic photovoltaics. *Chem.Rev.* 122, 14180-14274, 2022 **(A)**
- [2] D. Rossi, K. Forberich, F. Matteocci, M. Auf der Maur, H.-J. Egelhaaf, C. Brabec, A. Di Carlo. Design of highly efficient semi-transparent perovskite/organic tandem solar cells. *Solar RRL* 6, 2200242, 2022 **(B)**
- [3] E.N. Güler, A. Distler, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf. Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells. *Flex.Print.Electron.* 7, 025003, 2022 **(B)**
- [4] M. Steinberger, A. Distler, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf. Improved Air Processability of Organic Photovoltaics by Using a Stabilizing Antioxidant to Prevent Thermal Oxidation. *J.Phys.Chem. C* 126, 22-29, 2022 **(B)**
- [5] K.C. Tam, P. Kubis, P. Maisch, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf. Fully printed organic solar modules with bottom and top silver nanowire electrodes. *Progr.Photovoltaics* 30, 528-542, 2022) **(B)**
- [6] O. Balitskii, O. Mashkov, A. Barabash, V. Rehm, Hany A. Afify, N. Li, M. S. Hammer, C. J. Brabec, A. Eigen, M. Halik, O. Yarema, M. Yarema, V. Wood, D. Stifter, W. Heiss, Ligand Tuning of Localized Surface Plasmon Resonances in Antimony-Doped Tin Oxide Nanocrystals, *Nanomaterials* 12, 3469, 2022 **(A)**
- [7] P. Weitz, V. M. Le Corre, X. Du, K. Forberich, C. Deibel, C. J. Brabec, T. Heumüller, Revealing Photodegradation Pathways of Organic Solar Cells by Spectrally Resolved Accelerated Lifetime Analysis. *Adv. Energy Mater.* 12, 2202564, 2022 **(A)**
- [8] A. Aubele, Y. He, T. Kraus, N. Li, E. Mena-Osteritz, P. Weitz, T. Heumüller, K. Zhang, C. J. Brabec, P. Bäuerle, Molecular Oligothiophene–Fullerene Dyad Reaching Over 5% Efficiency in Single-Material Organic Solar Cells. *Adv. Mater.* 34, 1–9, 2022 **(A)**
- [9] Y. He, B. Wang, L. Lürer, G. Feng, A. Osvet, T. Heumüller, C. Liu, W. Li, D. M. Guldi, N. Li, C. J. Brabec, Unraveling the Charge-Carrier Dynamics from the Femtosecond to the Microsecond Time Scale in Double-Cable Polymer-Based Single-Component Organic Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* 12, 2103406, 2022 **(A)**
- [10] K. Burlafinger, S. Strohm, C. Joisten, M. Woiton, A. Classen, J. Hepp, T. Heumüller, C. J. Brabec, A. Vetter, Accelerated lifetime testing of thin-film solar cells at high irradiances and controlled temperatures. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 30, 518–527, 2022 **(B)**

W2 Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

1 Epitaktische Perowskit Laserstrukturen aus der Lösung

Unter Epitaxie versteht man das Wachstum von geordneten kristallinen Strukturen auf einem kristallinen Substrat. Epitaxie-verfahren werden in der Halbleiterindustrie immer dann eingesetzt, wenn eine besonders hohe Qualität der Halbleitermaterialien erforderlich ist. Bei den üblichen Epitaxieverfahren werden die Materialien aus der Dampfphase auf kristallinen Substraten abgeschieden. Um qualitativ hochwertige dünne Schichten oder selbstorganisierte Mikro- und Nanostrukturen zu erhalten, erfordern solche chemischen oder physikalischen Aufdampfverfahren Vakuumkammern, Hochtemperatur - Verdampfungsquellen und manchmal auch kryogene Kühlmittel zur thermischen Abschirmung. Darüber hinaus ist das kristalline Wachstum in der Regel mit erhöhten Wachstumstemperaturen verbunden, die den Adatomen eine ausreichende Oberflächendiffusivität bieten, damit sie die energetisch begünstigten Kristallstellen in der wachsenden Schicht oder in selbstorganisierten Mikro- oder Nanostrukturen erreichen. Im Vergleich zur Abscheidung aus der Gasphase ist die Lösungsphasenepitaxie mit verschiedenen Hindernissen konfrontiert, die sich aus der begrenzten Oberflächendiffusion in den Lösungsmitteln, den begrenzten Substrattemperaturen oder auch aus einer unreinen Umgebung ergeben, welche über die Atmosphäre gegeben ist, in der das Wachstum stattfindet. Für Metallhalogenid-Perowskite hingegen bietet die Lösungsprozessierung einfache und kostengünstige Möglichkeiten zur Herstellung optoelektronischer Bauelemente (Solarzellen, Photodetektoren, Leuchtdioden und Laser), meist in polykristalliner Form, aber auch in Form makroskopischer, mikrometergroßer oder nanokristalliner Einkristalle. Aufgrund der hervorragenden Ergebnisse von in Lösung prozessierten Metall-Halogenid-Perowskiten halten wir diese auch für attraktive Kandidaten für das epitaktische Wachstum aus Lösungen, die im Vergleich zur Dampfphasenepitaxie offensichtliche Vorteile bieten: fast keine Kosten für die Wachstumsausrüstung, Energieeffizienz aufgrund der Verarbeitung bei niedrigen Temperaturen und einfache Anwendbarkeit auch für organisch-anorganische Hybrid-Perowskite. Bei der Gasphasenepitaxie verursachen die Hybridperowskite große Probleme, da bei ihrer Zersetzung während der Verdampfung unvermeidlich Halogenwasserstoffsäuren entstehen, die stark korrosiv sind und die verwendeten Vakuumkammern und Pumpensysteme ruinieren. Über die Lösungsepitaxie von Perowskiten gab es bis zu dieser Arbeit nur eine Handvoll Berichte. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass das Spin-Coating von Perowskiten auf kristallinen Substraten zu orientierten Mikrokristallen oder sogar zu kristallinen Filmen aus MAPbI_3 (MA methylammonium) führt, die zu sensitiven Photodetektoren verarbeitet werden können.

Zu den elektrooptischen Bauelementen, deren Leistung entscheidend von der kristallinen Qualität abhängt, gehören Laser, die in der Regel durch epitaktisches Wachstum aus der Gasphase hergestellt werden. Laser auf der Grundlage von Metallhalogenid-Perowskiten wurden ebenfalls durch epitaktisches Wachstum in der Gasphase hergestellt. In diesem Fall liefert die Gasphasenepitaxie keine kontinuierlichen Filme, sondern selbstorganisierte Mikrokristallite, die nicht nur das Verstärkungsmaterial, sondern auch die Laserresonatoren bilden. Interessanterweise wurden die niedrigsten Laserschwellen, über die in der Literatur über Perowskit-Laser aus mikrokristallinen Resonatoren berichtet wird, nicht nur durch Abscheidung aus der Gasphase, sondern auch aus der Lösungsphase erzielt. Niedrige Schwellenwerte wurden

KONTAKT

Prof. Dr. Wolfgang Heiß

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
wolfgang.heiss@fau.de

Telefon
+49 911 5302-99216

auch durch dampfunterstützte Kristallisation mit Anti-Lösungsmittel (AVC) erreicht. Während die AVC-Methode Kristallite liefert, die sich in ungeordneter Weise z. B. auf amorphen Glassubstraten abscheiden, haben wir sie angewandt, um das epitaktische Wachstum von geordneten Mikroresonatoren auf kristallinen Glimmersubstraten zu demonstrieren. Im Vergleich zur Gasphasenepitaxie ist dieses lösungsepitaktische Wachstum energieeffizient und einfach, liefert aber Laserstrukturen, die den aus der Gasphase epitaktisch gewachsenen mindestens ebenbürtig sind, was die Laserschwelle die Qualitätsfaktoren der Resonatoren betrifft. Am EnCN wurde die lösungsmitteldampfgestützte Kristallisation (AVC) als Methode für das epitaktische Wachstum von MAPbBr₃-Mikroresonatoren vorgestellt. Als Substrat wurde Glimmer gewählt, da er ein inkommensurates Van-der-Waals-Wachstum von orientierten und gut facettierten Mikrokristalliten mit glatten Oberflächen ermöglicht. Es wurden Mikroresonatoren mit zwei Formen, nämlich flache Quader und längliche Mikroprismen mit dreieckigem Querschnitt, realisiert. Beide Arten von Mikroresonatoren weisen ein Laserverhalten oberhalb niedriger Schwellenwerte und eine hohe Stabilität auf. Aufgrund der unterschiedlichen Resonatorgeometrien unterstützen die Lasermoden entweder eine gerichtete Emission aus den länglichen Mikroprismen oder eine Verteilung der Strahlung in ebene Richtungen. Für beide Resonatortypen wurde jedoch ein Einmodenbetrieb erreicht, indem Bauelemente mit einer Resonatorlänge von $\approx 3,5$ μm ausgewählt wurden. Der Einmodenbetrieb ist von besonderer Bedeutung für die optische Verarbeitung und die digitale Kommunikation, bei der die Emission von Multimode-Lasern eine zeitliche Pulsverbreiterung und falsche Signale verursachen könnte. Das Singlemode-Lasern wurde durch die Auswahl geeigneter Bauelemente aus Ensembles von orientierten, aber zufällig großen und zufällig verteilten Mikroresonatoren erreicht. In Anbetracht des geringen Aufwands für das AVC-Epitaxiewachstum ist es erstaunlich, dass die Ergebnisse wie Laserschwellen oder Qualitätsfaktoren mindestens gleichwertig oder sogar besser sind als bei der Epitaxie aus der Gasphase. Dies könnte nicht nur für die von uns gezeigten MAPbBr₃-Strukturen gelten, sondern zumindest auch für die breitere Klasse der Metall-Halogenid-Perowskite, die derzeit in Bulk-Form mit verwandten Antisolvent-Dampfphasenverfahren gezüchtet werden. Die Erweiterung der derzeitigen Wachstumsmethoden durch die hier demonstrierte AVC-Lösungsepitaxie wird daher wahrscheinlich eine weitere Facette zum Gesamterfolg von Halbleitern auf Perowskit-Basis beitragen. Erstaunlich ist auch, dass das Wachstum der Laserresonatoren, das im Wesentlichen in einem sessilen Lösungströpfchen erfolgt, genauso homogen erfolgt wie bei der Abscheidung aus der Gasphase. Deshalb könnte die Lösungsepitaxie zumindest für Perowskit-Halbleiter eine ernsthafte Konkurrenz zur energetisch ineffizienten Gasphasenepitaxie darstellen.

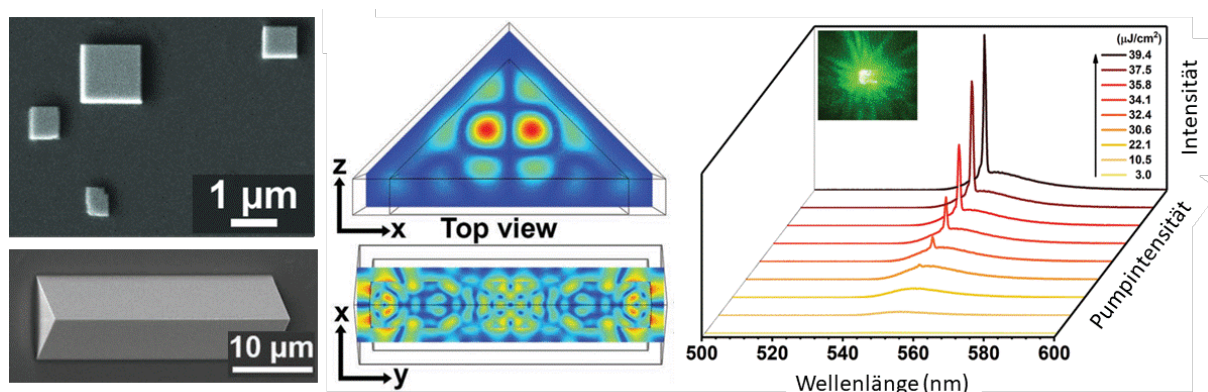


Abbildung 1: Lösungsepitaktisch gewachsene Mikroresonatoren auf Glimmersubstraten. Die berechnete Verteilung des elektrischen Feldes im Resonator weist auf eine directionale Emission aus den Mikroprisma-Resonatoren. Unter ausreichend intensivem optischem Pumpen beobachtet man nicht nur Lumineszenz der Perowskit-Halbleiter, sondern auch Lasertätigkeit, hier im Speziellen von einer einzigen Lasermode.

2 Schlussworte

Lösungsepitaxie ist eine einfache Methode für das Wachstum kristalliner Halbleiterstrukturen, welche bisher keine Anwendung gefunden hat, weil sie im Vergleich zu aufwendigen Wachstumsmethoden, die im Vakuum durchgeführt werden, eigentlich nicht gut funktioniert. Hier wurde sie aus einem Dornröschenschlaf geholt und auf Perowskit-Halbleiter angewendet, mit erstaunlichen Ergebnissen. Für Perowskit Halbleiter funktioniert die Lösungsepitaxie in etwa gleich gut wie die bisherig üblichen Wachstumsmethoden, obwohl die Lösungsepitaxie viel energieeffizienter und billiger ist.

3 Veröffentlichungen 2022

- [1] H. A. Afify, V. Rehm, A. Barabash, A. These, J. Zhang, A. Osvet, C. Schüßlbauer, D. Thiel, T. Ullrich, M. Dierner, T. Przybilla, J. Will, E. Spiecker, D. M. Guldi, C. J. Brabec, W. Heiss, *Adv. Funct. Mater.* **2022**, 32, 2206790
- [2] H. A. Afify, M. Sytnyk, V. Rehm, A. Barabash, O. Mashkov, A. Osvet, V. V. Volobuev, J. Korczak, A. Szczerbakow, T. Story, K. Götz, T. Unruh, C. Schüßlbauer, D. Thiel, T. Ullrich, D. M. Guldi, C. J. Brabec, W. Heiss, *Adv. Opt. Mater.* **2022**, 10, 2200237

FORSCHUNGSBEREICH

Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Matthias Luther
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 67540

Web
www.encn.de/netze

Elektrische Netze

Projektbericht 2022

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) beschäftigt sich am EnCN im Forschungsbereich Netze mit der Entwicklung, Analyse und dem Betrieb nachhaltiger elektrischer Energieversorgungssysteme unter dem Aspekt der Versorgungs- und Netzsicherheit.

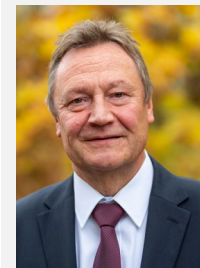
Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls liegen in der Modellierung und Analyse großräumiger Netzstrukturen mit hoher Durchdringung leistungselektronischer Umrichter, der Bewertung der Systemstabilität, sowie des Netzschutzes. Weitere Forschungsthemen liegen im Bereich hybrider Speichersysteme und Mikronetze, sowie deren netzdienlicher Regelung und Optimierung. Zur experimentellen Simulation im Bereich elektrischer Netze betreibt der Lehrstuhl mit dem Zentrum für angewandte Systemsimulationen (ZaS) eine Laborinfrastruktur für Hardware-in-the-Loop (HiL) und Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL) Untersuchungen. Durch die Kopplung von digitaler Netzberechnung und der experimentellen Simulation von Energiesystemen können Netzmodelle entwickelt, gegeneinander verifiziert und hinsichtlich ihres Systemverhaltens analysiert werden. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für die Auslegung und den Betrieb neuer Systemarchitekturen, die Entwicklung nachhaltiger Technologien sowie die wirtschaftliche Bewertung der erforderlichen Investitionsmaßnahmen.

Der LEES ist in mehreren nationalen und internationalen Netzwerken und Gremien involviert.

KONTAKT

Prof. Dr. Matthias Luther

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail

matthias.luther@fau.de

Telefon

+49 9131 85 67540

Web

www.encn.de

1 Zentrum für angewandte Systemsimulationen am EnCN

Nach fünf Jahren erfolgreicher Aufbauarbeit und Investition in den Standort Nürnberg, konnte der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme aus dem Bereich Netze mit seinem Zentrum für angewandte Simulationen den Betrieb aufnehmen. Hierzu erfolgte im September 2021 die finale Inbetriebnahme des Hardware-in-the-Loop Labors und der physische Zusammenschluss der bis dahin einzelnen Labore am EnCN zu einem verzahnten Laborkomplex.

Das ZaS blickt nun auf das erste erfolgreiche und abwechslungsreiche Betriebsjahr zurück. Neben einer Gerätespende der Firma A. Eberle stand der Einsatz in verschiedenen Projekten im Fokus. Darüber hinaus fand ein intensiver Austausch mit der Öffentlichkeit statt.

1.1 Gerätestiftung der Firma A. Eberle

Die Firma A. Eberle aus Nürnberg hat dem Lehrstuhl ein spezielles Regelsystem LVRSys™ für das Labor kostenfrei zur Verfügung gestellt, um die Forschung zur Energiewende zu unterstützen. Mit dem neuartigen Niederspannungs-

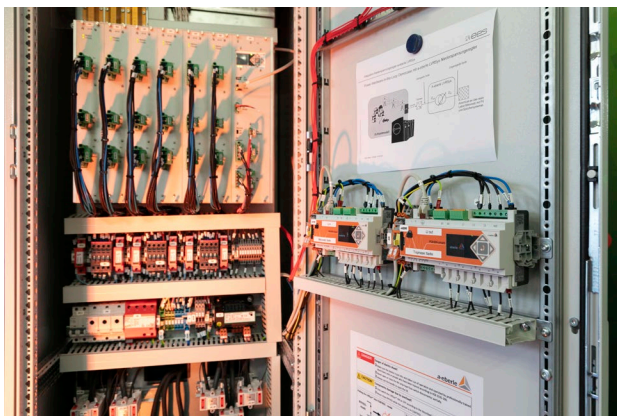


Abbildung 1 Blick in den LVRSys™ (Foto: FAU/Giulia Iannicelli)

Regelsystem lässt sich die Auslastung „schwacher“ Netze erhöhen, um beispielsweise den Zubau von Photovoltaikanlagen zu beschleunigen. Es ermöglicht die Integration zusätzlicher flexibler Lasten, wie zum Beispiel Ladestellen für Elektrofahrzeuge. Indem es die Netzspannung hoch- oder runterreguliert, weil zum Beispiel zu viele Haushalte in der Nachbarschaft gleichzeitig ihre Fahrzeuge laden oder an sonnigen Tagen viele Photovoltaikanlagen zugleich in das Niederspannungsnetz einspeisen, verhindert es Defekte oder Ausfälle von elektrischen Endgeräten. Durch das Regelungssystem lässt sich somit der notwendige Netzausbau im Niederspannungsnetz verringern.

In Kombination mit den Echtzeitsimulatoren des Lehrstuhls ist es darüber hinaus möglich, das Regelungssystem in eine Netzsimulation einzubinden, um beispielsweise realitätsgetreue Tagesverläufe innerhalb weniger Minuten zu simulieren, die Länge einer Anschlussleitung per Knopfdruck zu verändern oder die Integration zusätzlicher Photovoltaikanlagen nachzubilden.

1.2 Ausbildung für den Netzwiederaufbau und Resilienz

Eine sichere Stromversorgung ist der zivilisatorischen Grundversorgung (Daseinsversorgung) zuzuordnen. Insofern werden an die elektrische Energieversorgung sehr hohe Ansprüche hinsichtlich Versorgungssicherheit und Versorgungsqualität gestellt. Die Betriebsführung der Stromnetze (Leitwarte) ist hierbei die zentrale Schaltstelle, auf der die Sicherheit des Netzes überwacht und im Bedarfsfall gesteuert wird. Das europäische UCTE-Stromnetz als größte vom Menschen jemals errichtete „Maschine“ läuft in seiner Gesamtheit seit Inbetriebnahme unterbrechungsfrei. Dennoch steigt mit fortschreitender technischer Entwicklung die Gefahr eines systemweiten Blackouts jährlich. Ein längerer systemweiter Blackout würde zu einem Zusammenbruch der gesamten öffentlichen Infrastruktur führen. Ein Extremszenario, welches von der Öffentlichkeit praktisch unbemerkt blieb, war im Januar 2021 die notmäßige Auftrennung des UCTE-Verbundnetzes in zwei Teile. Lokale Blackouts hingegen haben starke Auswirkungen auf jeden Einzelnen und können durch Kaskadeneffekte einen systemweiten Blackout lostreten. Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme beschäftigt sich in Forschung und Lehre intensiv mit diesem Themenkomplex und erhielt 2022 durch die Stiftung Innovationen in der Hochschullehre im Rahmen des Förderprogramms Freiraum 2022 die notwendige Förderung, um diese Thematik in einem Lehr-Projekt umzusetzen. Ziel des Lehr-Projekts ist es, Studentinnen und Studenten die zugehörigen Zusammenhänge in der Theorie zu vermitteln und dieses Wissen dann in einer realitätsnahen Netzleitwatumgebung realistisch in Planspielen umzusetzen. Hierzu kooperiert der Lehrstuhl im Rahmen des Projekts mit der Siemens AG Nürnberg. Durch die angestrebte Kooperation soll ein nachhaltiger Austausch zwischen Praxis und Forschung generiert werden. Die Partner bringen einerseits einen der leistungsstärksten Echtzeitsimulatoren im akademischen Bereich in das Projekt ein, andererseits ein professionelles Trainingscenter mit einer Netzleitwarte. Durch diese Symbiose kann eine weltweit absolut einmalige Ausbildung etabliert werden.

1.3 Das ZaS auf der Langen Nacht der Wissenschaften

Nach der Pandemiepause fand am 21. Mai 2022 in der Metropolregion Nürnberg/Fürth/Erlangen endlich wieder die Lange Nacht der Wissenschaften statt.

Am ZaS wurden den Besucher:innen an sieben Stationen in vier Räumen verschiedene Aspekte der zuverlässigen Energieversorgung nähergebracht. Im Microgrid- und Energiespeicherlabor ENGiNe wurde in interessanten, fachlichen und aufklärenden Gesprächen über unterschiedliche Speichertechnologien und den netzdienlichen Einsatz von Leistungselektronik zur Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz diskutiert.

Im Rahmen einer Postersession wurden die Grundlagen der elektrischen Energieversorgung, aktuelle Projekte und Forschungsthemen präsentiert. Mit diesem



Abbildung 2: Versuchsvorbereitung auf der Langen Nacht der Wissenschaften

Wissen wurden die interessierten Gäste anschließend in die Tücken der Netzsicherheitsrechnung vor dem Hintergrund der Energiewende eingeführt. In dem Echtzeitlabor konnten die Besucher:innen anhand von drei Beispielen einen Einblick in den simulierten Netzbetrieb in Echtzeit erhalten. So konnte mit einem manuell einstellbaren Regler die Leistung eines simulierten Kraftwerks an Lastsprünge angepasst und so die Dynamik der Netzfrequenz beobachtet werden. Auch die Funktionalität und Wichtigkeit der Schutztechnik wurde den Besucher:innen anhand eines praktischen Aufbaus nahegebracht. Zuletzt wurde den Gästen die Prüfung einzelner Betriebsmittel mit Hilfe des Echtzeitsimulators anhand eines Transformatorstufenschalters erläutert.

An allen Stationen wurden Teilaspekte der elektrischen Energieversorgung und Gerätetechnik beschrieben, die sich mit Fortschreiten der Energiewende wandeln und anpassen werden müssen.

Die Zahl der Teilnehmenden lag auf gleichem Niveau wie vor 2020. Dies zeigt, dass das Interesse an der elektrischen Energieversorgung und an der Energiewende nach wie vor stark ist. Das Ziel, dieses Interesse an technischem Verständnis zu wecken und zu bestärken, wurde mehr als erfüllt.

2 Projekte

Der Bereich Netze war 2022 mit mehreren Projekten am EnCN vertreten. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Drittmittelprojekte. Schwerpunktmäßig liegen die Tätigkeiten am EnCN im Bereich der Systemstabilität (Prof. Matthias Luther) und des Netzschutzes (Prof. Johann Jäger). Somit leistet der EnCN einen Beitrag zum Erhalt der Versorgungssicherheit in Deutschland.

Das **Kopernikus-Projekt ENSURE** ([link](#)) verfolgt mit einem ganzheitlichen Ansatz das Ziel, neue Energienetzstrukturen für die Energiewende zu erforschen und bereitzustellen. Hierfür wird eine umfassende Energiesystemoptimierung unter Berücksichtigung aller relevanten Energieträger vorgenommen. Dabei wird als wichtigstes Hauptziel geklärt, wie zentrale und dezentrale Energieversorgungselemente im Gesamtsystem ausgestaltet sein müssen. Als zweites Hauptziel erfolgt die praktische Umsetzung der entwickelten systemischen Konzepte und die Erprobung neuer Technologien in einem großtechnischen Demonstrationsprojekt. Derzeit läuft die zweite Förderphase des Verbundprojekts. Die Förderung erfolgt durch das BMBF.

Darüber hinaus wurden im Berichtszeitraum zwei Projekte zur **Echtzeit Co-Simulation** erfolgreich abgeschlossen. Eines der Projekte wurde gefördert durch die Bayrische Forschungsförderung, das andere ist ein reines Industrieprojekt. Im Projekt **Demonstrator zur RMS-EMT Netzkopplung in Echtzeit** ([link](#)), bei der Bayrischen Forschungsförderung, wurde

hierbei sehr eng mit der Firma OPAL-RT Germany GmbH (KMU mit Sitz in Nürnberg) zusammengearbeitet. OPAL-RT Germany ist ein Tochterunternehmen von OPAL-RT Inc., einer der weltweit führenden Hersteller von Echtzeitsimulatoren für Stromnetzsimulationen.

In dem Verbundprojekt **VeN²us** (VerNetzte NetzschUtssysteme) steht die Entwicklung und der Feldtest eines vernetzten adaptiven Netzschutzes im Fokus. Durch die digitale Vernetzung der Schutzgeräte sowie der automatischen Adaption der Schutzparameter auf die jeweilige Netzsituation soll zum einen die Transportkapazitäten von „grünem Strom“ erhöht werden und zum anderen die Versorgungssicherheit. Die Förderung erfolgt durch das BMWK.

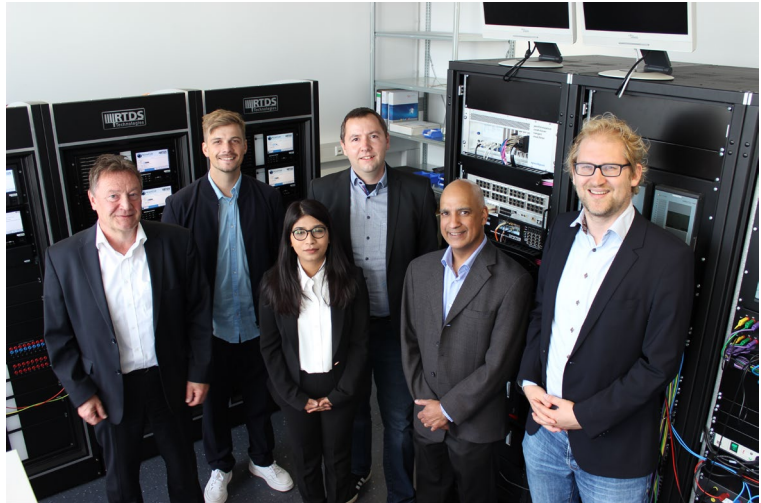


Abbildung 3: Mitarbeiter von OPAL-RT Germany und des LEES beim Projektabschlusstreffen

3 Schlussworte

Die Forschung des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme im Forschungsbereich Netze leistet einen Beitrag zur Transformation des Energieversorgungssystems zu einer dekarbonisierten Stromversorgung, mit der wesentlichen Randbedingung der Aufrechterhaltung einer hohen Versorgungssicherheit und Zuverlässigkeit in der deutschen Energieversorgung. Die intensiven Kooperationen mit Forschungseinrichtungen, Herstellern und Netzbetreibern stärken zudem das zukünftige Potential von Forschung und Entwicklung in der Metropolregion Nürnberg, Fürth, Erlangen. Von 2017 bis 2021 ist es gelungen, am EnCN mehrere Labore aufzubauen und diese zu einem Zentrum für Angewandte Simulationen weiterzuentwickeln. Hierauf aufbauend konnte im Jahr 2022 der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme die Zukunft am EnCN aktiv mitgestalten.

4 Vorträge & Poster 2022

- [1] G. Mehlmann, „Netze für Energiewende und Versorgungssicherheit“, *Kopernikus Symposium*, 2022
- [2] G. Mehlmann, „Die Rolle von Stromrichtern zur Sicherung der Netzstabilität“, *Aktuelles aus Naturwissenschaft und Technik*, Collegium Alexandrinum, 2022
- [3] J. Porst, „Höherauslastung der Stromnetze am Beispiel von Netzboostern“, *Frag den Experten – Lösungen für die Energiezukunft*, Vortragsreihe am EnCN, 2022
- [4] Matthias Luther, „Forschung für den Klimaschutz: Wie sieht das Stromnetz der Zukunft aus?“, *Lange Nacht der Wissenschaften*, Vortrag am EnCN, 2022

5 Veröffentlichungen

- [5] C. Scheibe, A. Kuri, L. Graf, R. Venugopal and G. Mehlmann, "Real Time Co-Simulation of Electromechanical and Electromagnetic Power System Models," *2022 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Eindhoven, Netherlands, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST53650.2022.9898468
- [6] Christian Scheibe, Ananya Kuri, Yuyao Feng, Le Zhao, Xuejun Xiong, Piergiovanni La Seta, Xiao Peng Liang, Johannes Knödtel, Philipp Holzinger, Marc Reichenbach, Gert Mehlmann, "Interfacing real-time and offline power system simulation tools using UDP or FPGA systems", *Electric Power Systems Research*, Volume 212, 2022, 108490, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108490>.
- [7] A. Kuri, R. Zurowski, G. Mehlmann and M. Luther, "Power Dispatch Capacity of a Grid-Forming Control Based on Phase Restoring Principle," in *IEEE Systems Journal*, doi: 10.1109/JSYST.2022.3229103
- [8] T. Wagner, J. Richter, C. Scheibe, S. Resch, G. Mehlmann and M. Luther, "Analysis of Different Latencies and Time Delays in a Coupled Power-Hardware-in-the-Loop Laboratory," *2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Victoria, BC, Canada, 2022, pp. 446-451, doi: 10.1109/EPEC56903.2022.10000169
- [9] A. Kuri, R. Zurowski, G. Mehlmann, D. Audring and M. Luther, "A Novel Grid Forming Control Scheme Revealing a True Inertia Principle," *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Denver, CO, USA, 2022, pp. 1-1, doi: 10.1109/PESGM48719.2022.9917107
- [10] A. Kuri, S. Gäbel, I. Burlakin, T. Wagner, G. Mehlmann, M. Luther, „A Novel Concept for Dynamic Network Reduction Dedicated to Real-Time Application”, *Kyoto Symposium 2022 - CIGRE Japan*. Kyoto, 2022
- [11] A. Kuri, R. Zurowski, G. Mehlmann, D. Audring, M. Luther, "Phase Restoring Principle: Concept of a novel grid-forming converter scheme", *ETG-VDE, Netzreglung und Systemführung 2022* (pp. 6). Leipzig, Germany: VDE - Netzreglung und Systemführung, 2022
- [12] S. Resch, J. Friedrich, T. Wagner, G. Mehlmann, M. Luther, "Stability analysis of power hardware-in-the-loop simulations for grid applications", *Electronics*, 11(1). <https://dx.doi.org/10.3390/electronics11010007>
- [13] J. Meyer, J. Jaeger, "Protection Security Assessment with Guiding Optimization Criteria based on Stability Indices", *IEEE ISGT Europe 2022*, Serbia, doi: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960547
- [14] Meyer G. J.; Jäger J., „Data Lake Based Approach for a Predictive Review and Optimization of Protection Settings", *IEEE PES GM 2022*, Denver, Colorado

FORSCHUNGSBEREICH

Speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Jürgen Karl
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

E-Mail
juergen.karl@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 99021

Web
www.encn.de/speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Peter Wasserscheid
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

E-Mail
peter.wasserscheid@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 27420

Web
www.encn.de/speicher

SPEICHER

Projektbericht 2022

Im Jahr 2022 ist die Förderung ausgelaufen, so dass nur noch anderweitig durch Drittmittel finanzierte Projekte am Standort EnCN stattfanden.

Das Projekt „Kopernikus II, P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von Power-to-X-Konzepten“ mit dem Förderkennzeichen 03SFK2L0-2 wurde weiterhin in den Laboren am EnCN bearbeitet. In diesem Projekt wurden Katalysatoren zur effizienten Freisetzung von Wasserstoff aus LOHC sowie Methoden zur Reinigung des bei der Dehydrierung von LOHC entstehenden Wasserstoffs entwickelt. Ebenso wurde der Einsatz einer thermochemischen Wasserstoffkompression erprobt.

Teile des EU-Projektes „SherLOHCk: Sustainable and cost-efficient catalyst for hydrogen and energy storage applications based on liquid organic hydrogen carriers: economic viability for market uptake“ mit der Projektnummer 101007223 wurden am EnCN bearbeitet. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung bimetallischer Katalysatoren zur Dehydrierung von LOHC.

In diesen Projekten wurden im Jahr 2022 durchgehend 2 Doktoranden am EnCN eingesetzt.

Das Projekt „Herstellung und Charakterisierung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren zur Anwendung in Sorptionsspeichern“ wurde mit zwei Doktoranden am EnCN bearbeitet.

KONTAKT

Projektkoordinator
Prof. Dr. Peter Wasserscheid

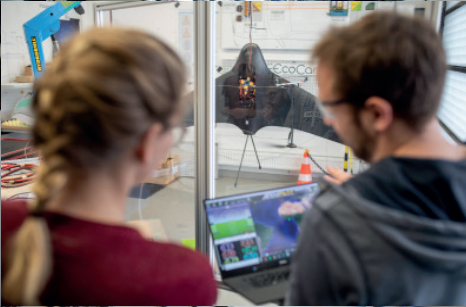
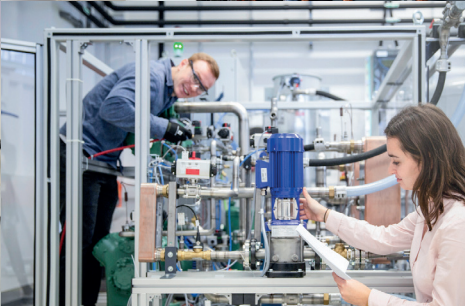
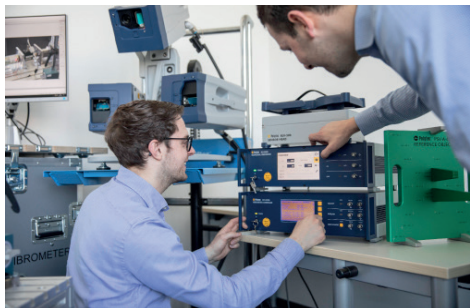
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

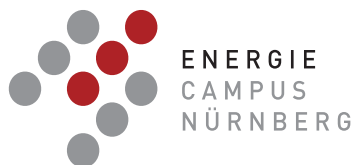


E-Mail
Peter.Wasserscheid@fau.de

Telefon
+49 9131 85 27420

Web
www.encn.de





Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911 5302 99120
[www.@encn.de](http://www.encn.de)

Partner:



Gefördert durch:



Bayerische Staatsregierung

Unterstützt durch:



Wirtschafts- und
Wissenschaftsreferat