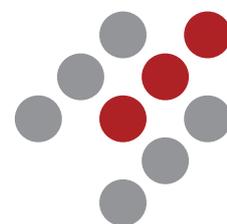




FORSCHUNGSBERICHT

2020



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

Vorwort



In den letzten Jahren hat die Debatte rund um den Klimaschutz und die Energiepolitik weltweit eine völlig neue Dynamik entfaltet. Ausgehend von den „Fridays-for-Future“ ist Bewegung in viele Handlungsfelder gekommen. In Deutschland wurde mit dem Klimapaket der Bundesregierung eine Wende in der Klimapolitik eingeleitet, die eine Bepreisung von CO₂-Emissionen als Leitinstrument in den Mittelpunkt stellt. Im Rahmen des Konjunkturpakets anlässlich der Corona-Krise sind neben den unmittelbaren Maßnahmen zur Konjunkturbelebung auch umfangreiche Investitionen in Zukunftsthemen vorgesehen. Der größte Bestandteil des Zukunftspakets ist die Nationale Wasserstoffstrategie. Auch auf europäischer Ebene zeichnet sich ab, dass die Ambitionen im Klimaschutz im Zuge der Corona-Pandemie nicht nachlassen. Die neue EU-Kommission strebt mit dem European Green Deal eine klimaneutrale Gesellschaft im Jahr 2050 an und setzt zwangsläufig auf Wasserstoff und synthetische Energieträger sowie die Integration des Energiesystems in der Umsetzung.

Auch der Themenkomplex nachhaltiger Gebäude und Quartiere spielt in den Überlegungen der EU und in Deutschland eine große Rolle, es soll eines der Vorzeigeprogramme des Green Deals werden. Die Herausforderungen bestehen zum einen darin, die Sanierungsrate von Bestandsgebäuden anzuheben, vorrangiges Ziel auf einem nachhaltigen Pfad wird aber die intelligente Kopplung von Wärme- und Strombedarf auf Basis erneuerbarer Quellen sein. Neben der Systemintegration muss es dabei auch gelingen, marktfähige Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Eine Umsetzung der klimapolitischen Ambitionen erfordert eine immense Innovationskraft in Bayern, Deutschland und Europa und eine konsequente Umsetzung der zahlreichen klimapolitischen Initiativen. Sie birgt aber insbesondere auch Chancen für Industriestandorte wie Bayern, über die Transformation der Industrie hin zu klimaneutralen Technologien die Wettbewerbsfähigkeit auszubauen, attraktive Geschäftsmodelle in der Region zu erschließen und neue (Energie-) Partnerschaften zu erschließen.

Am EnCN sind wir mit unseren Forscherinnen und Forschern ideal aufgestellt, um diese Fragen aus der Sicht verschiedener Disziplinen zu beleuchten, die Perspektiven zusammenzuführen und Lösungen gemeinsam mit Wirtschaft und Politik zu erarbeiten. Im Team können wir begreifbar machen, was die klimapolitischen Ziele für Bayern bedeuten, was sich ändern wird und welche Chancen sich daraus ergeben. Hierfür haben wir drei Forschungsschwerpunkte in den Bereichen Wasserstofftechnologie, Gebäude, und Energiesysteme identifiziert, in denen der EnCN seine zukünftige Forschung bündelt. In allen drei Forschungsschwerpunkten ist erfolgreiche Technologieentwicklung und Markteinführung für eine weitere erfolgreiche Transformation und Dekarbonisierung des Energiesystems dringend notwendig. Die Akteure im Energie Campus Nürnberg haben in den Bereichen umfangreiche Forschungsexpertise und die am gemeinsamen Standort „Auf AEG“ geschaffenen Strukturen bieten eine ideale Voraussetzung. Die Komplexität der Fragestellungen erfordert eine Zusammenarbeit über Disziplin- und Institutionsgrenzen hinweg. Die Metropolregion Nürnberg, seit jeher ein deutschlandweit herausragender Standort für die Energiewirtschaft, ist mittlerweile zu einem weithin sichtbaren Zentrum der Energieforschung mit großer Schlagkraft geworden. Der EnCN bündelt seit nunmehr 10 Jahren die Kompetenz von sieben renommierten Forschungseinrichtungen und vereint nachgewiesene Exzellenz in der Forschung entlang der Kompetenzfelder der ansässigen Unternehmen. So wurde ein Kristallisationspunkt geschaffen, an dem eine

Vielzahl von Akteuren zusammenspielen, um die Zukunft zu gestalten und Visionen mit der breiten Öffentlichkeit zu teilen. Die Bürgerinnen und Bürger erreichen wir mit unseren Themen in vielfältigen Veranstaltungsformaten.

Trotz der Einschränkungen aufgrund der Coronapandemie war das Jahr 2020 auch mit Blick auf das wissenschaftliche Personal und die Aktivitäten am EnCN von einer hohen Dynamik gekennzeichnet. Zahlreiche Nachwuchswissenschaftler wurden auf renommierte Professuren im In- und Ausland berufen. Diese bleiben über das 2019 gestartete Fellowship-Programm mit dem EnCN verbunden, das auch über die Alumni hinaus unser nationales und internationales Netzwerk nachhaltig stärkt. Neue Impulse für die weitere Entwicklung des EnCN ergeben sich insbesondere aus dem im Oktober vorgelegten Evaluationsbericht, der zahlreiche Maßnahmen und Aktivitäten zur weiteren Stärkung der internen und externen Vernetzung des EnCN vorsieht. Am Standort des EnCN „Auf AEG“ ist auch im Umfeld des EnCN in den vergangenen Jahren ein lebendiges Netzwerk entstanden, dem mehrere Lehr- und Forschungseinrichtungen (z.B. das Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg oder der Nuremberg Campus of Technology), Netzwerke (z.B. die ENERGIEregion Nürnberg, das Energie-Technologische Zentrum 2.0 oder das BayWISS-Kolleg Energie) und Unternehmen aus der Energiebranche angehören.

Die großen Herausforderungen der Energiewende liegen im Bereich unserer Kernkompetenzen: mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien müssen die Themen Strom, Wärme und Mobilität zunehmend zusammen gedacht werden. Die Kopplung der Sektoren in einem intelligenten Energiesystem erfordert nicht nur in der Energiewirtschaft, sondern auch in der Forschung den Aufbau neuer und belastbarer Schnittstellen. **Der Energie Campus Nürnberg ist hervorragend aufgestellt, um entlang zentraler technologischer, ökonomischer und politischer Handlungsfelder diese Entwicklung zu begleiten, die Umsetzung von neuen Technologien in marktfähige Produkte zu beschleunigen, exzellente Nachwuchskräfte zu qualifizieren und Partnerschaften mit Wissenschaftseinrichtungen und Unternehmen in aller Welt zu initiieren.**

Die Zusammenarbeit der verschiedenen Institutionen im und rund um den EnCN ist ein Alleinstellungsmerkmal für die Metropolregion Nürnberg. Dieser Jahresbericht beleuchtet ein weiteres Kapitel der Erfolgsgeschichte eines Kooperationsmodells, das auf einzigartige Weise Brücken baut zwischen verschiedenen Institutionen, Disziplinen und gesellschaftlichen Perspektiven. Die Energieforschung in Bayern ist ohne den EnCN nicht mehr denkbar.

Dezember 2020



Prof. Dr. Veronika Grimm, Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung

Inhaltsverzeichnis

HIGHLIGHTS 2020	4
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN	12
Organisation des EnCN	13
Standort und Netzwerk.....	21
Jahresrückblick 2020.....	23
Ausblick 2021.....	32
EnCN GESCHÄFTSSTELLE.....	33
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	41
Projekt Effizienz	42
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN	106
Lehrstuhl für Leistungselektronik	107
W1-Professur „Energieinformatik“	113
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN	116
Projekt Energiemarktdesign	117
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEN	141
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld.....	142
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“	161
FORSCHUNGSBEREICH NETZE	165
Projektübersicht Netze	166
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER	174
Projekt Speicher A – Speicher mit Systemrelevanz bis 2022.....	175
Projekt Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022	198

Highlights 2020

Effizienz



Einfluss der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik

Durch den Ausbrand quaderförmiger, sphärischer und zylindrischer Porosierungsmittel werden im Ziegel Poren mit unterschiedlichen Geometrien, aber mit stets konstantem Einzelporenvolumen von 9 mm^3 erzeugt. Zylinderförmige Porosierungsmittel verursachen eine longitudinale Vorzugsorientierung der Zylinderporen im Ziegel. Daraus resultiert bei senkrecht zur Zylinderachse verlaufendem Wärme-strom die stärkste Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeit um 27 %. Dieser Effekt kann zur weiteren Verbesserung der Wärmedämmung von Mauerziegeln genutzt werden.

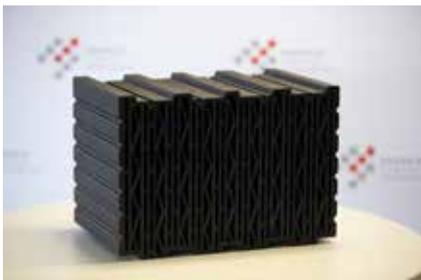
>> Effizienz



Überkritische CO₂-Trocknung von Silica-Aerogel-Monolithen

Durch ein Upgrade des Reaktoraufbaus zur überkritischen CO₂-Trocknung gelingt die Herstellung hochwärmedämmender, mit Nanofasern verstärkter Silica-Aerogel-Monolithe mit höchsten Wärmedämmeigenschaften. Durch eine optimierte Kontrolle der Prozessparameter können handhabbare Silica-Aerogel-Monolithe von hoher Transparenz und Rissefreiheit synthetisiert werden.

>> Effizienz



Verbesserung von Schallschutz und Wärmedämmung durch „Schallstopper-Technologie“

Mit der neu entwickelten „Schallstopper-Technologie“ kann das bewertete Schalldämm-Maß R_w , also die Schalldämmeigenschaft eines Mauerziegels um 1,4 dB, entsprechend um 40 % erhöht werden. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äq}}$ der Mauerziegel, d.h. die Wärmedämmeigenschaften, erhalten bleiben.

>> Effizienz



Herzo Base Energiespeicherhäuser

Der Reihenhaus-Komplex aus dem F&E-Projekt „Herzo Base“ wird im Folgeprojekt „Herzo Opt“ durch ein energetisches und baustofftechnisches Monitoring wissenschaftlich begleitet. In der zweiten Monitoringperiode konnte ein Autarkiegrad von 65 % (PV + Batterieanteil) und damit eine Steigerung von 4 %-abs. ermittelt werden. Darüber hinaus erfolgte der erfolgreiche Betrieb zweier modellprädiktiver Regelungen (MPC). Während des MPC-Betriebes wurden Lastprognosen mittels der Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen erstellt und zeigten eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlich eingetretenen Lasten.

>> Effizienz



Fassade³: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes

Im gemeinsamen BMWi-Projekt „Fassade³“ der TH Nürnberg, des ZAE Bayern und weiterer Partner nimmt das entwickelte Fassadenkonzept Gestalt an. Im dritten Projektjahr wurde ein Mock-up des modularen und stromerzeugenden Fassadenelements in Kitzingen errichtet. An diesem wurde die elektrische Kopplung der Elemente und die Integration der innovativen Komponenten (organische PV, nachhaltiger Dämmstoff und selektivbeschichteter Sonnenschutzbehang) erprobt sowie der Einsatz von Messtechnik. Im Jahr 2021 ist geplant, die Südfassade eines Wohngebäudes mit den Fassadenelementen auszustatten und in einem Monitoring wissenschaftlich zu begleiten.

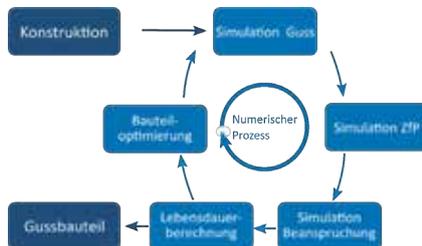
>> Effizienz



Prüfstand „Smart Energy Bench“

Im Rahmen der Programmsäule „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ des Landesprogramms wurde ein bestehender Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstand wesentlich erweitert. Damit wird zum einen die normgerechte Prüfung von Wärmepumpen und die Untersuchung zahlreicher anderer versorgungstechnischer Komponenten ermöglicht. Die Einbindung von BHKW, PV, Strom- und Wärmespeicher sowie diversen Regelungen erlaubt den Betrieb bzw. die Emulation komplexer Systeme inkl. Räume und Gebäude und eine Optimierung innovativer netzdienlicher Systeme mit hohem (volatilen) Anteil regenerativer Energie, mit Fokus auf zukünftige Smart-Grid-Funktionen.

>> Effizienz



Verbundprojekt DNAGuss: Definition der Prozesskette in der Gussindustrie

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekt DNAGuss wurde im Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEff) ein evolutionäres Modell der numerischen Prozesskette in der Gussindustrie entworfen. Von einer einfachen linearen Prozesskette bis hin zu einer Modellierung mit Rückkopplungsmechanismen konnte mit den Projektbeteiligten erstmals eine vollständige numerische Prozesskette entwickelt werden.

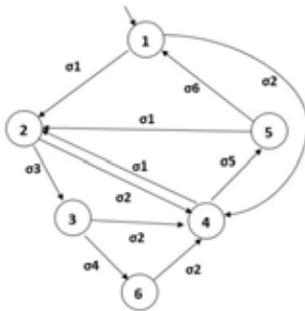
>> Effizienz



EUROGUSS 2020: Forschung die Wissen schaf(f)t

Vom 14. bis 16. Januar stellte das Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEff) auf der größten europäischen Druckgussmesse, der EUROGUSS 2020 in Nürnberg, seine Forschungsergebnisse vor. Auf der Sonderschau *Forschung, die Wissen schaf(f)t* konnte sich das Fachpublikum anhand einer interaktiven Präsentation einen Eindruck über die Leistungsfähigkeit der Forschergruppe verschaffen. Vorgestellt wurden unter anderem das am Energiecampus entwickelte und bei der Firma pressmetall Gunzenhausen GmbH im Einsatz befindliche Prozess Monitoring System.

>> Effizienz



Virtuelles 25. Symposium Simulationstechnik

Am 14. und 15. Oktober 2020 wurde von der Arbeitsgemeinschaft Simulation das 25. Symposium Simulationstechnik veranstaltet. An der Tagung nahmen 200 Simulationsexperten aus dem In- und Ausland teil. Dabei war der Arbeitsbereich EFFIZIENZ des Energiecampus Nürnberg mit 3 Vorträgen vertreten, die von der simulationsbasierten Dimensionierung von Hochtemperatur-Regeneratoren bis zur simulationsgestützten Optimierung des Betriebsablaufes in einer Gießerei reichten.

> Effizienz



Verbundprojekt KI-Power: Echtzeit Berechnungsplattform "UltraZohm" die Forschung an modernen Ansteuerverfahren

Die im Projekt KI-Power entwickelte Berechnungsplattform „UltraZohm“ bietet bisher nicht verfügbare Rechenleistung für moderne Ansteuerverfahren. In der Entwicklung setzt das Projektteam auf einen Community basierenden Open Source Ansatz, wodurch zahlreiche internationale Wissenschaftler einbezogen werden können. Somit vereinfacht das UltraZohm die Forschung an Regelverfahren für leistungselektronische Systeme und elektrische Antriebe.

>> Effizienz



Erfolgreiche Ausgründung: Zohm Control GmbH

Aus dem Teilprojekt Effizienz konnte im November 2020 erfolgreich die Zohm Control GmbH gegründet werden. Die Ausgründung besteht aus Wissenschaftlern der TH Nürnberg sowie TU München. Die Zohm Control GmbH industrialisiert moderne Regelverfahren und Berechnungsplattformen. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der modellprädiktiven Regelung sowie KI-basierter Methoden.

>> Effizienz

Energiemanagement-Technologien



Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2020

Die renommierte Auszeichnung wurde Herrn Dr. Bernd Eckardt und Dr. Stefan Matlok für die Entwicklung einer ganz neuen Generation von extrem leistungsfähigen und effizienten Gleichspannungswandlern als zentrale Komponente für alle Arten von zukünftigen Brennstoffzellenfahrzeugen zu Land, zu Wasser und in der Luft verliehen. Mit ihren Entwicklungen auf dem Gebiet der Systemintegration, der Schaltungs- und Regelungstechnik haben sie die Tür zu einer bislang unerreichten Systemperformance aufgestoßen.

>> EMT

Energiemarktdesign



© Shutterstock 401845456

Risikoaversion im Strommarkt und (regulatorische) Unsicherheit

Unsicherheit in Bezug auf zukünftige Änderungen von Marktumfeld und Marktregeln hat einen starken Einfluss auf Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazitäten. Dies kann für den Fall sogenannter „regulatorischer Unsicherheit“ am Beispiel einer möglichen Einführung von Preiszonen als Quelle der Unsicherheit gezeigt werden. Weiter wird ein stochastisches mehrstufiges Gleichgewichtsmodell mit risikoaversen Agenten entwickelt, das Investitionen in Übertragungs- und Erzeugungskapazität abbildet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Effekt der Risikoaversion in einem Markt mit Knotenpreisen stärker ausgeprägt ist als in einem Markt mit einem Einheitspreis. Darüber hinaus können Netzplaner, die nicht die Risikoaversion von Erzeugungsunternehmen antizipieren erhebliche zusätzliche Kosten verursachen.

[>> EMD](#)



© Shutterstock 1773386396

Wasserstoffökonomie in gekoppelten Energiemärkten

Grüner Wasserstoff und darauf basierende synthetische Kraftstoffe sind CO₂-neutrale Alternativen zu fossilen Energieträgern. Ihre Produktion wird vorzugsweise in Regionen mit niedrigen Stromgestehungskosten erfolgen, kann aber auch auf regionaler Ebene in Deutschland eine Rolle spielen. Es werden daher Modelle entwickelt mit denen eine Kopplung von Strom-, Gas- und Wasserstoffmärkten in Deutschland untersucht werden kann. Die Stromgestehungskosten erneuerbarer Technologien sind in den letzten Jahren deutlich gesunken, variieren global aber sehr stark. Mit dem Teilprojekte „Speicher B“ des EnCN werden daher außerdem mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, die sich durch besonders gute Verfügbarkeit und ein großes Potential erneuerbarer Stromerzeugung auszeichnen und aus denen Deutschland in Zukunft grünen Wasserstoff importieren könnte.

[>> EMD / Speicher B](#)



© Shutterstock 138247598

Buchungvalidierung im Europäischen Entry-Exit Gasmarkt

Gasnetzbetreiber sind verpflichtet Nominierungen, die sich innerhalb der unterzeichneten Buchungsverträge befinden, zu transportieren. Bei Annahme von Buchungen durch den Netzbetreiber muss eine unendliche Anzahl von möglichen Nominierungen antizipiert und auf einen zulässigen Transport innerhalb des Netzes geprüft werden. In diesem Projekt wird das Problem der Buchungvalidierung mathematisch analysiert. Für Netzwerke ohne Kreise bzw. bestehend aus einem Kreis konnte bereits ein effizienter Algorithmus für die Buchungvalidierung entwickelt werden. Für allgemeine Netze wurde eine Charakterisierung von zulässigen Buchungen entwickelt, die es ermöglicht Buchungen mit Hilfe verschiedener Optimierungsprobleme zu validieren. Diese Optimierungsprobleme zu lösen ist mathematisch besonders anspruchsvoll, da die Buchungvalidierung auf allgemeinen Netzwerken als mathematisch "schwer" klassifiziert wurde.

[>> EMD](#)



© Shutterstock 1351635368

Investitionen in dezentralen Energiesystemen

Es werden Investitionen in existierende dezentrale Systeme mit einem mehrstufigen stochastischen Optimierungsproblem untersucht, das Investitionsentscheidungen über mehrere Perioden unter Unsicherheit erfasst und das Problem bis zur globalen Optimalität löst. Um die Leistung von konventionellen Ansätzen, die in einem mehrjährigen Setup angewandt werden, zu bewerten und das Problem mit geringerem Rechenaufwand zu lösen, wird eine rollierende Horizont-Heuristik vorgeschlagen, um Näherungslösungen für das ursprüngliche mehrstufige stochastische Problem zu identifizieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Approximation von Investitionen durch zweistufige stochastische Ansätze die besten Ergebnisse hinsichtlich der Erfüllung von Nebenbedingungen bringt, während deterministische Approximationen schnellere und bessere Lösungen liefern.

>> EMD

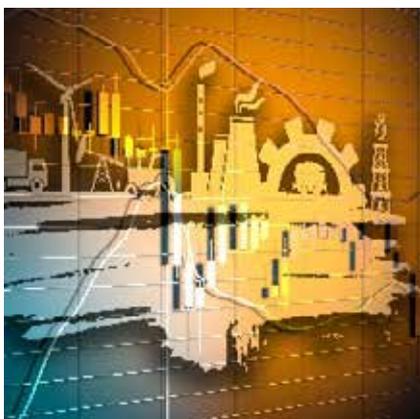


@ IStock 000021743345

Ausschreibungsdesign für erneuerbare Energien

Mithilfe von Ausschreibungen soll seit 2017 ein möglichst effizienter Zubau von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten erreicht werden. Bisher bilden die Ausschreibungsformate jedoch insbesondere die Vorteile einer verbrauchsnahe Ansiedlung von Anlagen nur unzureichend ab. Im Projekt wurden daher mithilfe numerischer Simulationen verschiedene alternative Ausschreibungsformate bezüglich der Effizienz der regionalen Verteilung der Anlagen und der Höhe der Einspeisevergütung verglichen. Auf Basis der Resultate und theoretischer Überlegungen wird eine kombinatorische Auktion mit regionalen Quoten vorgeschlagen, die bestmöglich die Ziele einer effizienten regionalen Verteilung mit dem Ziel der Minimierung der Förderkosten verbindet.

>> EMD



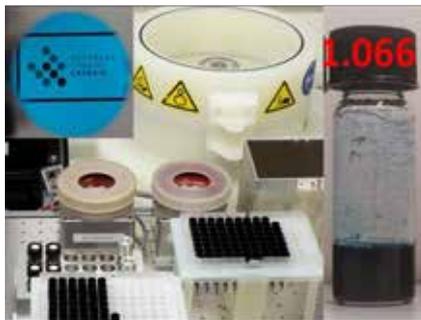
© Shutterstock 1056930098

Modellierung von Entry-Exit Gasmärkten

Mithilfe von Ausschreibungen soll seit 2017 ein möglichst effizienter Zubau von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten erreicht werden. Bisher bilden die Ausschreibungsformate jedoch insbesondere die Vorteile einer verbrauchsnahe Ansiedlung von Anlagen nur unzureichend ab. Im Projekt wurden daher mithilfe numerischer Simulationen verschiedene alternative Ausschreibungsformate bezüglich der Effizienz der regionalen Verteilung der Anlagen und der Höhe der Einspeisevergütung verglichen. Auf Basis der Resultate und theoretischer Überlegungen wird eine kombinatorische Auktion mit regionalen Quoten vorgeschlagen, die bestmöglich die Ziele einer effizienten regionalen Verteilung mit dem Ziel der Minimierung der Förderkosten verbindet.

>> EMD

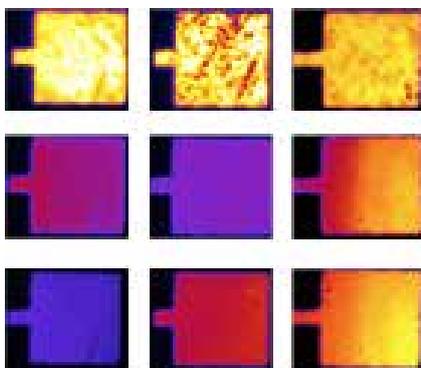
Erneuerbare Energien



Roboter unterstützt Entwicklung schaltbarer Fenster

Schaltbare Fenster dimmen Licht auf Knopfdruck und sparen dabei Energie für andere Abschattungselemente und eventuell auch für Klimaanlage. Im Teilprojekt „EET - Smarte Fenster“ wurden zwei Roboter eingesetzt, um Tinten für die Herstellung elektrochromer Bauteile halbautomatisiert zu optimieren. Dabei wurde die Präzision und Schnelligkeit der eingesetzten Roboter verwendet, um zügig ein Rezept für die Formulierung der Tinten und deren Filmabscheidung zu entwickeln, wobei auch ein Augenmerk auf die Skalierbarkeit dieser Prozesse gelegt worden ist.

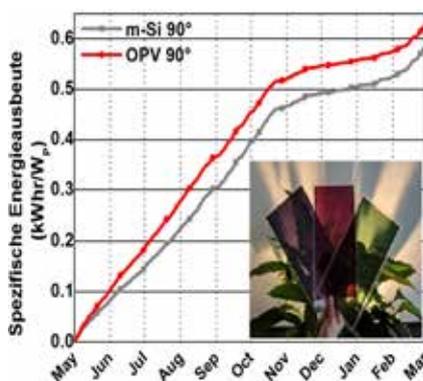
>> Erneuerbare Energien



Elektrolumineszenz und Photolumineszenz zur Stabilitätsanalyse

Innerhalb des Teilprojekts „EET – zerstörungsfreie bildgebende Analyse“ wurden während der letzten Jahre effektive Elektrolumineszenz- und Photolumineszenz-Methoden zur Charakterisierung organischer Halbleiterschichten für die Photovoltaik entwickelt, mit denen Defekte, Morphologie und Zusammensetzung untersucht werden können. Über die unmittelbare Qualitätskontrolle hinaus konnten diese Methoden auch äußerst effizient zur Untersuchung von Degradationsmechanismen unter Beleuchtung eingesetzt werden, um effiziente und langzeitstabile Solarzellen zu entwickeln.

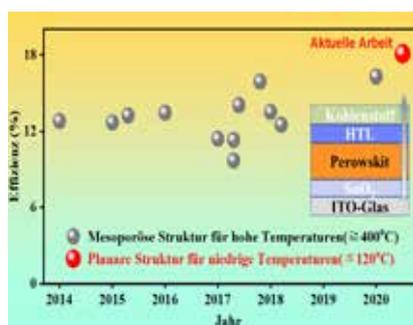
>> Erneuerbare Energien



Organische Solarmodule – leicht, flexibel, bunt, langlebig und effizient

Im Teilprojekt „EET – Bauwerkintegrierte PV“ wurden Rolle-zu-Rolle-Druckverfahren für die Herstellung semitransparenter organischer Photovoltaik (OPV)-Module soweit optimiert, dass hochqualitative Module nun auch in großen Mengen für Anwendungen in Gebäudefassaden zur Verfügung stehen. Der spezifische Energieertrag, d.h. die erzeugte elektrische Arbeit pro W_p installierter Leistung, der vertikal montierten OPV-Module im Außeneinsatz ist dem von Si-Modulen aufgrund des geringeren Temperaturkoeffizienten überlegen. Im Beobachtungszeitraum eines Jahres wurde keine messbare Degradation beobachtet.

>> Erneuerbare Energien



Vollständig gedruckte Perowskit-Solarzellen mit 18% Effizienz

Während der Effizienz-Weltrekord bei Perowskit-Solarzellen (PSZ) bereits bei 25% liegt, konnten vollständig lösungsprozessierte PSZ bisher lediglich 16% erreichen. Im Teilprojekt „EET – 2D- und 3D-Beschichtungstechnologien“ wurden durch Optimierung der Zellarchitektur, der Materialauswahl und der Prozessierung kosteneffiziente und stabile PSZ mit 18% Effizienz entwickelt, die sich bei niedrigen Temperaturen und selbst in trockener Umgebungsluft vollständig mittels Druckverfahren herstellen lassen, so wie dies für einen industriellen, skalierbaren Prozess erforderlich ist.

>> Erneuerbare Energien



Photolumineszenz und Absorption zur Effizienz und Stabilitätsvorhersage

Die starke Expertise innerhalb des Teilprojekts „EET - zerstörungsfreie bildgebende Analyse“ zur zerstörungsfreien Analyse, mit optischen Methoden wie Photolumineszenz und Absorption, konnte über die Bildgebung hinaus erfolgreich eingesetzt werden. Insbesondere spektral aufgelöste Messungen wurden zur „Machine Learning“-basierten Vorhersage von Solarzellen-Parametern eingesetzt. Anhand von Absorptionsdaten wurde nicht nur die Effizienz, sondern auch die Stabilität vorhergesagt. Photolumineszenz-Messungen ermöglichten zudem ein tiefes Verständnis der Bauteil-Photophysik, das in der Fachzeitschrift *Nature Energy* veröffentlicht wurde.

[>> Erneuerbare Energien](#)

Netze



Power-Hardware-in-the-Loop-Simulation realer Betriebsmittel

Eine Photovoltaikanlage während einer Netzstörung beobachten? Betriebsmittel an das elektrische Netz anschließen, die es noch gar nicht gibt? Per Knopfdruck zwischen der Charakteristik eines Inselnetzes, eines Industrie-Arealnetzes oder dem Netz eines regionalen Energieversorgers hin- und herzuschalten?

Diese und weitere Testszenarien ermöglicht die 2020 in Betrieb genommene Erweiterung des Mikronetz- und Energiespeicherlabors *ENGiNe* mit einem RTDS-Echtzeitsimulator zur Power-Hardware-in-the-Loop Simulation.

[>> Netze](#)

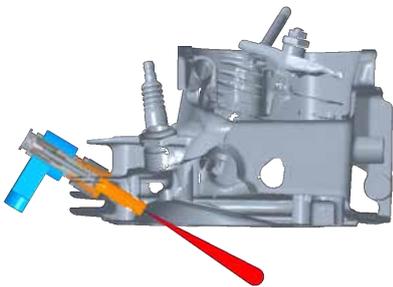


Projektstart Kopernikus ENSURE Phase II

Anfang Februar hat auch das dritte Kopernikus-Projekt die Arbeit in der zweiten Förderphase aufgenommen: ENSURE wird in den kommenden Jahren den Aufbau des Energiekosmos ENSURE in acht Gemeinden Schleswig-Holsteins vorbereiten. Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme ist im Teilprojekt Integrierte Systemstrukturen tätig, welches sich mit der sektorenübergreifenden Ausgestaltung der Energienetzstrukturen bei einer weit fortgeschrittenen Energiewende über 2030 hinaus beschäftigt.

[>> Netze](#)

Speicher



Umsetzung eines Modell-BHKW mit realer Dehydrierung

Im Projektjahr 2020 werden im Forschungsschwerpunkt effiziente Wasserstoffnutzung (FSP 3) alle Vorbereitungen getroffen, um ein Modell-Blockheizkraftwerk mit realer Dehydrierung betreiben zu können. Dazu wird in den Zylinderkopf des Verbrennungsmotors des BHKW ein Wasserstoffdirektinblaseventil integriert. Als Dehydriereinheit kommt der im FSP 2 entwickelte Reaktor zum Einsatz. Dieser wird entsprechend in den Abgasstrang des Modell-BHKW integriert.

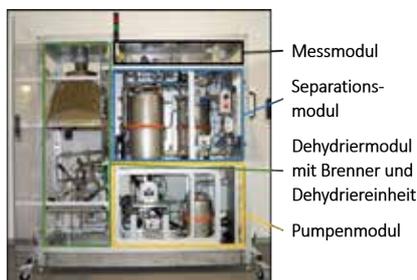
[>> Speicher](#)



Inbetriebnahme der miniOne-Anlage

Zur Untersuchung des oneReactor-Konzepts wurde die miniOne-Anlage im dafür vorgesehenen Container im Speicherhaus untergebracht. Die Inbetriebnahme erfolgte vor Ort unter Verwendung des LOHC-Systems Dibenzyltoluol/Perhydrodibenzyltoluol. Die Dehydrierung von LOHC wurde untersucht. Die Durchführung von Hydrier- und Zyklenversuchen sowie die Umstellung auf das LOHC-System Benzyltoluol/Perhydrobenzyltoluol zur umfassenden Charakterisierung der Anlage sind für das kommende Jahr 2021 geplant.

[>> Speicher](#)



H₂-Freisetzung aus LOHCs mit einem Brenner als Wärmequelle

Die Freisetzung des in flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHCs) gespeicherten Wasserstoffs ist ein endothermer Prozess. Durch die Nutzung eines Brenners für den Freisetzungsprozess können die Dynamik der Wasserstofffreisetzung und die Systemeffizienz deutlich gesteigert werden. Die in der linken Abbildung gezeigte, modular aufgebaute Anlage ermöglicht den Test und die Verbesserung verschiedener Brennerkonzepte mit unterschiedlichen Brennstoffen. Eine effektive Freisetzung konnte u.a. mit einem methanbetriebenen Porenbrenner erzielt werden.

[>> Speicher](#)



Reaktorkonzept im Mittelpunkt weiterer Drittmittelprojekte

Das im Energie Campus Nürnberg erstmalig entwickelte und realisierte Heatpipe-gekühlte Reaktorkonzept steht im Fokus einer ganzen Reihe akquirierter Drittmittelprojekte des Lehrstuhls für Energieverfahrenstechnik. Stand heute wird bereits im Rahmen eines EU-Vorhabens (RFCS-Projekt „i³upgrade“) sowie in mehreren national geförderten Verbundprojekten (BMW-Projekte „Power-to-Biogas“ und „Kläffizient“, BMELV-Projekt „FlexBiomethane“) an der Weiterentwicklung des Konzepts gearbeitet, um dieses durch die Erprobung in industriell relevanten Umgebungen in einen hohen technologischen Reifegrad zu überführen.

[>> Speicher](#)

Überblick über den EnCN

Im Jahr 2017 startete der Energie Campus Nürnberg (EnCN) in die zweite Förderphase. Der Freistaat Bayern fördert die Kooperation im Zeitraum bis 2021 mit insgesamt 25,6 Millionen Euro. Die Fördermittel stehen insbesondere für die Fortführung der erfolgreichen Forschungsarbeiten aus der ersten Förderphase, sowie für das Dach und den Betrieb der gemeinsamen Forschungsimmoblie zur Verfügung. Damit kann die institutionen- und disziplinübergreifende Zusammenarbeit der Wissenschaftler im EnCN weitergeführt und vertieft werden. Die Zusammenarbeit der Partnerorganisationen im EnCN wird 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), dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) sowie dem Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE) unterschrieben wurde. Die Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach ist in der zweiten Förderperiode als weiterer Forschungspartner im EnCN mit Projektbeteiligung im Forschungsbereich Effizienz hinzugekommen.

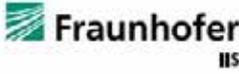
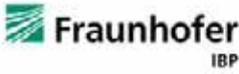
	<p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Mit 38.000 Studierenden und 260 Studiengängen eine der größten, forschungsstärksten und innovativsten Universitäten in Deutschland.</p>
	<p>Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm Eine der größten und forschungsstärksten Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Deutschland, mit rund 13.000 Studierenden.</p>
	<p>Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. Materialforschung, Komponentenentwicklung und Systemoptimierung in den zentralen Bereichen Energiespeicherung, Energieeffizienz und Erneuerbare Energien.</p>
	<p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie IISB Leitungselektronik, Intelligente Energiesysteme, Elektromobilität, Halbleitertechnologie, Materialien für die Elektronik und Energietechnik.</p>
	<p>Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Angewandte FuE für kognitive Sensorik, Datenerfassung, Kommunikationstechnologien, Datenauswertung und Steuerung mit künstlicher Intelligenz.</p>
	<p>Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Angewandte FuE auf den Gebieten Energieeffizienz, Raumklima, Akustik, Hygiene und Sensorik, Baustoffrecycling, Hygrothermik und Ganzheitliche Bilanzierung.</p>
	<p>Hochschule Ansbach Eine junge und moderne Hochschule für angewandte Wissenschaften mit mehr als 3.000 Studierenden im Bereich Technik, Wirtschaft und Medien mit dem Forschungsschwerpunkt industrielle Energieeffizienz.</p>

Abbildung 1: Forschungspartner im EnCN

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 (dem „Dach“), sowie einer Projektstruktur, die sich aus insgesamt 6 Forschungsbereichen mit insgesamt 5 vom Freistaat Bayern geförderten Projekten zusammensetzt. Darüber hinaus arbeiten die Forscher auch in forschungsbereichsübergreifenden Drittmittelprojekten zusammen.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über Organisations- und Gremienstruktur des EnCN sowie deren Zusammensetzung und zentrale Aufgaben.

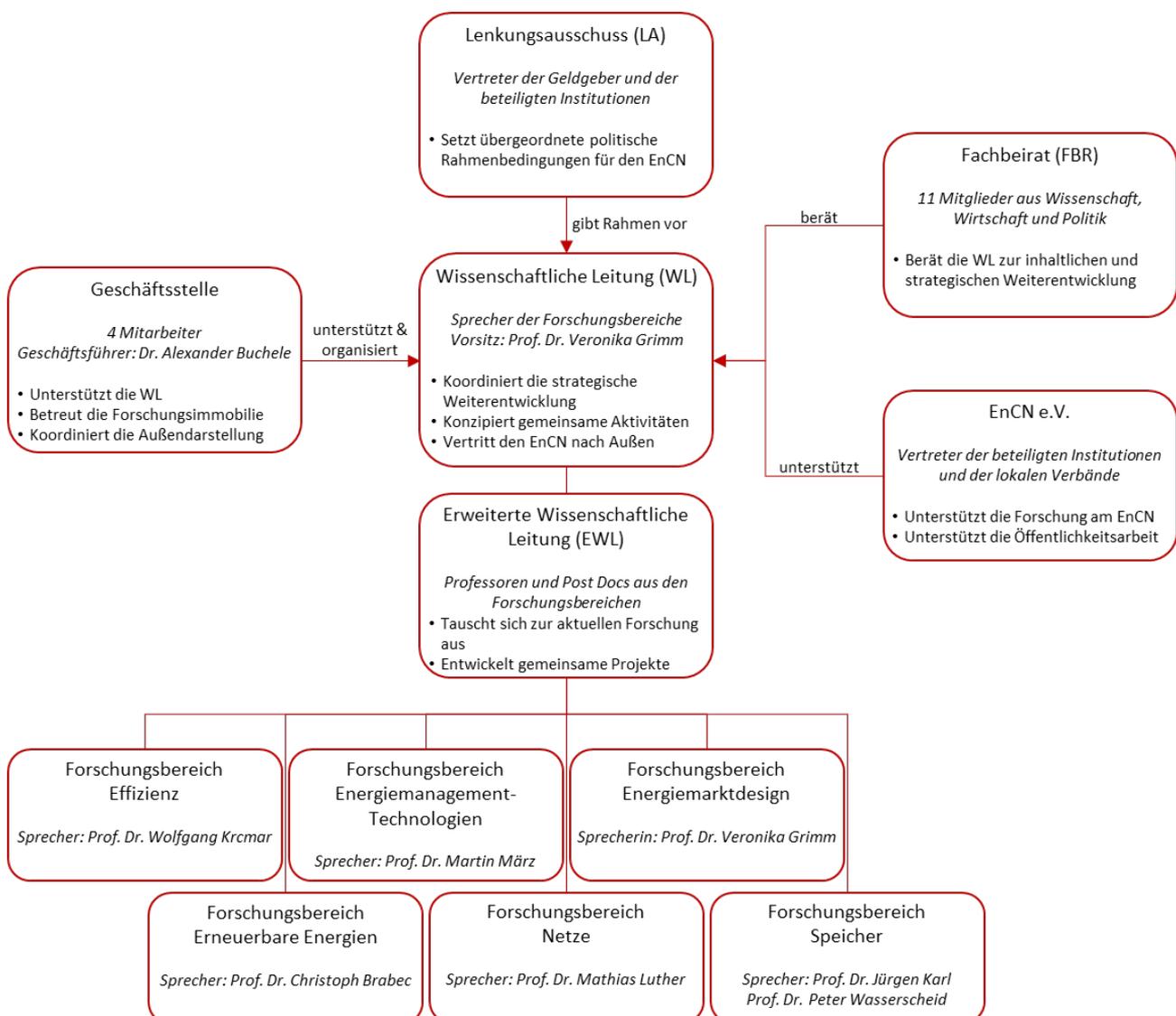


Abbildung 2: Überblick über die Gremienstruktur des EnCN sowie deren Zusammensetzung und zentrale Aufgaben

Themen- und Projektstruktur

Forschungsbereiche des EnCN



Abbildung 3: Überblick über die Forschungsbereiche entlang der Energiekette

Inhaltlich orientieren sich die 6 Forschungsbereiche des EnCN entlang der Energiekette von der Erzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zur effizienten Nutzung von Energie. Ein Überblick in die Struktur ist in Abbildung 3 dargestellt. Forschungsbereichsübergreifend bearbeiten die Forschungspartner Verbundprojekte, die auf dem Campus des EnCN zusammengeführt werden. Die Forschungsbereiche der 5 vom Freistaat Bayern geförderten Projekte sind Erneuerbare Energien, Energiespeicher mit Systemrelevanz bis 2022, Energiespeicher mit Marktreife bis 2022, Effiziente Energienutzung und Energiemarktdesign. Die Projekte sind noch einmal in 18 Teilprojekte mit insgesamt 44 Teilprojektleitern eingeteilt. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend und disziplinübergreifend organisiert. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilweise werden Arbeiten jedoch an anderen Orten durchgeführt, weil die Infrastrukturausstattung im EnCN nicht für alle Aktivitäten ausreichend ist.

Insgesamt ist während der ersten Förderperiode eine tragfähige Struktur der verschiedenen Disziplinen und Institutionen gewachsen, die nun in der zweiten Förderperiode mit den 5 ähnlich dimensionierten, vom Freistaat geförderten Projekten eine solide Basis mit bereits zahlreichen Schnittstellen bildet. Die Forscher in den 6 Forschungsbereichen werden diese Basis in den kommenden Jahren weiter ausbauen.

In allen Forschungsbereichen bearbeiten die Wissenschaftler auch Drittmittelprojekte, die von verschiedensten Auftraggebern (Land, Bund, EU, Industrie) finanziert werden. Dabei haben sich die drei in Abbildung 4 dargestellten disziplin- und institutionsübergreifenden Forschungsschwerpunkte herauskristallisiert. In allen drei Forschungsschwerpunkten ist erfolgreiche Technologieentwicklung und Markteinführung dringend notwendig, um die weitere erfolgreiche Transformation und Dekarbonisierung des Energiesystems voranzubringen. Dies betrifft vor allem auch den Industriestandort Bayern und wird viele potentielle Unternehmenspartner ansprechen. 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.



Abbildung 4: Die drei institutions- und disziplinübergreifenden Forschungsschwerpunkte am EnCN

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. Die Ausnahmen bildet der Bereich Speicher, der 2 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 Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung.



Abbildung 5: Wissenschaftliche Leitung

Mitglieder der Wissenschaftliche Leitung sind:

Vorsitzende der

Wissenschaftlichen Leitung: Prof. Dr. Veronika Grimm (FAU)

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 (Energiemanagementtechnologien; 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 beteiligter PIs zu befördern und die Weiterentwicklung ständig mit allen beteiligten Wissenschaftlern voranzutreiben. Ziel ist eine engere Vernetzung aller Beteiligten und die Initiierung von disziplin- und institutionsübergreifenden Forschungsaktivitäten. Die Erweiterte Wissenschaftliche Leitung trifft sich in der Regel anschließend an die Sitzung der Wissenschaftlichen Leitung.

Tabelle 1: Mitglieder der Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung

Name	Institution	Forschungsbereich
Dr. Jakob Albert	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Wolfgang Arlt	FAU, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik	Speicher
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. Bernd Fischer	FhG IISB	Energiemanagement-Technologien
Prof. Dr. Hannsjörg Freund	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Florian Gallwitz	THN, Fakultät Informatik	Effizienz
Dr. Denise Geburtig	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Reinhard German	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Prof. Dr. Veronika Grimm	FAU, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie	Energiemarktdesign, Speicher

Name	Institution	Forschungsbereich
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 Heiß	FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften	Erneuerbare Energien
Prof. Dr. Roland Ismer	FAU, Lehrstuhl für Steuerrecht und Öffentliches Recht	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Johann Jäger	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Prof. Dr. Jürgen Karl	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
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
Prof. Walter Mehl	THN, Fakultät Design	Effizienz
Dr. Gert Mehlmann	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Dr. Dominik Müller	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Dr. Karsten Müller	HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Dr. Michael Neubert	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Dr. Patrick Preuster	HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Prof. Dr. Marco Pruckner	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Karlheinz Ronge	FhG IIS, Vernetzte Systeme und Anwendungen	Energiemanagement-Technologien
Prof. Dr. Eberhard Schlücker	FAU, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik	Speicher
Prof. Dr. Wolfgang Schlüter	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
Prof. Dr. Gregor Zöttl	FAU, Professur für Volkswirtschaftslehre	Energiemarktdesign, 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. Diese Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Das Dach ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Das Dach bündelt auch die Zusammenarbeit mit dem Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.



Abbildung 6: Team der Geschäftsstelle

Die Geschäftsstelle besteht aus:

Geschäftsführer	Dr. Alexander Buchele
Assistenz	Ioanna Dimopoulou
Projektmanagement	Kristin Zeug
Gebäudemanagement	Wolfgang Schlaffer
Design und Fotografie (freie MA)	Alisa Zellner
Unterstützung Administration	Patrizia Wüst

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.

Vorstandsvorsitzender	Christian Zens (Kanzler der FAU)
Stellvertretende Vorsitzende	Prof. Dr. Arno Dentel (THN) Prof. Dr. Albert Heuberger (Leiter des Fraunhofer IIS)
Weitere Vorstandsmitglieder	Prof. Dr. Vladimir Dyakonov (Vorstand des ZAE Bayern) 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 und je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter von Institutionen, die den EnCN strukturell über einen längeren Zeitraum mit erheblichen finanziellen Mitteln unterstützen. 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 Partner über die strategische und inhaltliche Ausrichtung des EnCN zu beraten und nimmt Stellung zum jährlichen Gesamtbericht der Sprecherin des EnCN, Frau Prof. Grimm.



Abbildung 7: Fachbeirat

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* 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 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. Dies ist der achte Jahresbericht und umfasst den Berichtszeitraum 01.01.2020 bis 31.12.2020. Die Jahresberichte für die Jahre 2011 bis 2019 können auf Anfrage über die Geschäftsstelle des EnCN bezogen werden.

Zahlen und Fakten

Die Förderperiode verläuft sehr erfolgreich. Aktuell arbeiten 155 Forscherinnen und Forscher in den sechs Forschungsbereichen (45 EWL, 110 Mitarbeiter). Die Forschungsarbeiten verteilen sich auf eine Forschungsfläche von 5.200 qm und 30 Labors und Technikumsräume.

Die Partner am EnCN haben seit Beginn der zweiten Förderphase Drittmittel von insgesamt rund 36 Mio € (gegenüber 2019 von rund 22 Mio. €) eingeworben. Diese Mittel verteilen sich auf über 160 einzelne Projekte mit insgesamt mehr als 230 Partnern aus Industrie und Wissenschaft. In der zweiten Förderphase wurden bislang 21 Patente angemeldet.



Abbildung 8: Das EnCN Hauptgebäude bietet auf 5 Etagen mit 5000qm Fläche Raum für 150 Forscher und für Veranstaltungen mit bis zu 170 Besuchern.

Standort und Netzwerk

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, 2km von der Nürnberger Innenstadt entfernt und ist mit öffentlichen Verkehrsmitteln über den U-Bahn Anschluss sowohl vom Nürnberger, als auch vom Fürther Hauptbahnhof in wenigen Minuten erreichbar. Mit der A73 besteht ein unmittelbarer Autobahnanschluss, über den Erlangen in ca. 15min erreicht werden kann. Der Nürnberger Flughafen kann in ca. 15 min angefahren werden.



Abbildung 9: Der EnCN befindet sich in der Nürnberger Weststadt, auf dem ehemaligen AEG Gelände, direkt an der Fürther Straße.

Nach dem 2012/2013 erfolgten Umbau, wurden im EnCN auf ca. 6.000 qm Fläche, verteilt auf zwei Gebäude, Labore, Technika, Werkstätten und Büros für rund 150 Forscher aus den 6 Partnerinstitutionen geschaffen. Auf dem Campus „Auf AEG“ sind auch der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, FAPS, das E|Drive Center und das E|Home Center der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, der Nuremberg Campus of Technology (NCT), die Green Factory Bavaria sowie das Helmholtz Institut für Erneuerbare Energien (HI ERN) angesiedelt, mit denen der EnCN eng kooperiert. Gegenwärtig gibt es auf dem AEG Gelände eine Forschungsfläche von ca. 12.000 qm mit direktem Bezug zu Energiethemen.

Für die zweite Förderphase wurden am EnCN verschiedene Umzüge und Umbaumaßnahmen durchgeführt. So entsteht unter anderem ein großes Speichertechnikum („Speicherhaus“), in dem verschiedene Speichertechnologien im Pilotmaßstab betrieben werden.

Die Region

Der EnCN liegt mitten in der europäischen Metropolregion Nürnberg (EMN). In der EMN leben 3,5 Millionen Menschen, was 27% der Bevölkerung des Freistaats Bayern entspricht, auf einer Fläche von 21.800km² (ca. 31 % der Fläche von Bayern). Sie erwirtschaften ein Bruttoinlandsprodukt von 124 Mrd. € (ca. 22% von Bayern)¹.

Die europäische Metropolregion verfügt in sieben Bereichen über international herausragende Kompetenzen. Diese Bereiche sind u.a.:

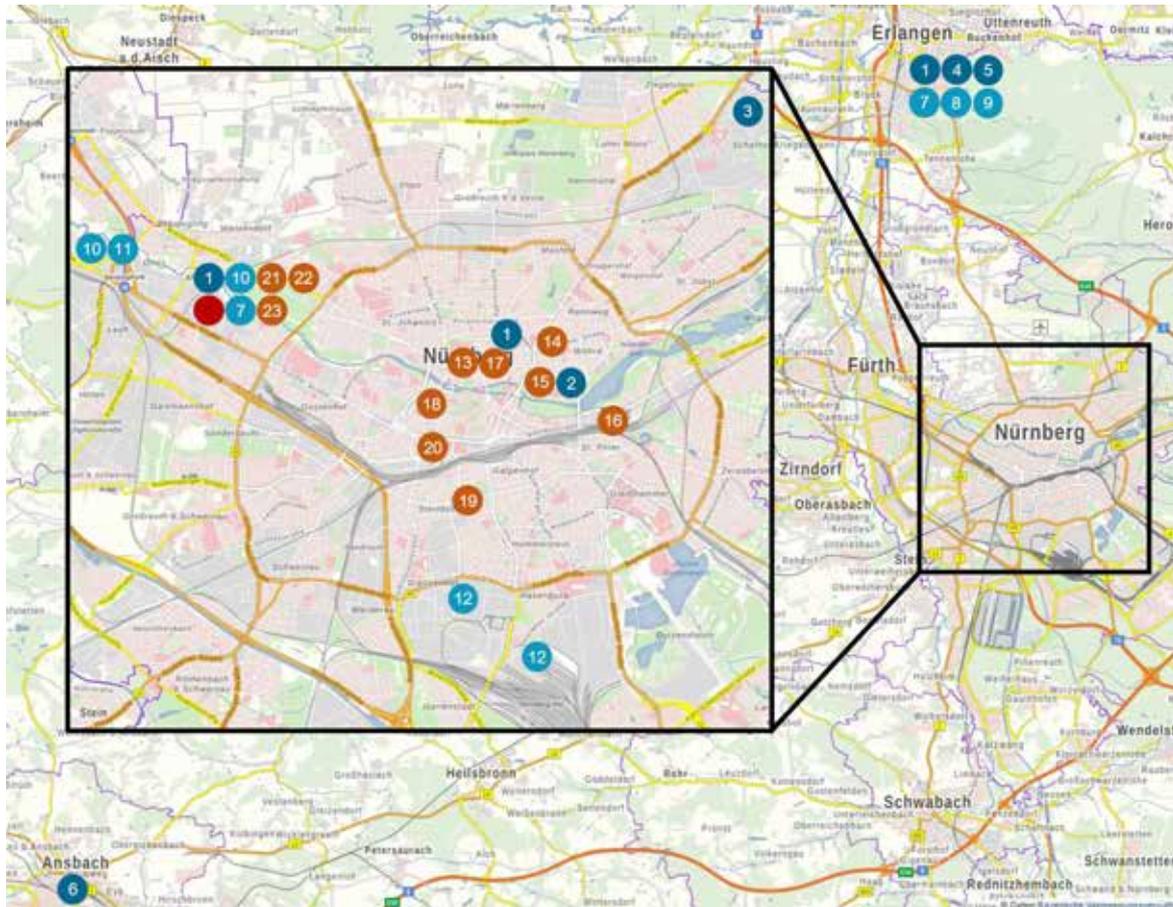
- Verkehr und Logistik
- Information und Kommunikation
- **Energie** und Umwelt
- Neue Materialien

¹ Quellen: EMN und Bayerisches Landesamt für Statistik; Stand 2015

Der Energiesektor ist einer der wichtigsten Wirtschaftsfaktoren der EMN. In diesem Sektor arbeiten über 110.000 Beschäftigte in über 14.000 Unternehmen². Die wirtschaftlichen Kernkompetenzen in der EMN werden im Zuge des Leitbilds Wachstum & Beschäftigung im Aktionsfeld „Nachhaltige Energiesysteme“ gebündelt.

Netzwerk

Der EnCN ist mit zahlreichen Energieprojekten und –initiativen in der Region vernetzt und arbeitet eng mit ihnen zusammen. Abbildung 10 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 10: EnCN Netzwerk in der Region

² Quelle: Wirtschaftliche Bedeutung des Energiesektors in der Europäischen Metropolregion Nürnberg, Studie im Auftrag der Stadt Nürnberg, 2013

Jahresrückblick 2020

Wissenschaftliche Aktivitäten

Konferenzen und Seminare

Aus den Reihen der EnCN-Forscher werden zahlreiche nationale und internationale wissenschaftliche Veranstaltungen (Seminare, Workshops, Konferenzen) zu den Forschungsthemen im EnCN organisiert und durchgeführt:

Tabelle 2: Von EnCN-Wissenschaftlern organisierte Workshops, Seminare und Konferenzen

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
14./15.01., EnCN	Pleanarsitzung EU-Projekt LightCoce	Prof. Krčmar
18.11., online	NUEdialog 2020 - Zukunft Wasserstoff	Prof. Grimm
02.12., online	Regenerative Energien und Kältetechnik	Prof. Dentel
07.-09.12., online	next generation solar energy conference	Prof. Brabec



Abbildung 11: Workshop LightCoce (links) – Setup zum Nuedialog (mitte) – Mitschnitt Konferenz NGSE (rechts)

Berufungen und persönliche Auszeichnung

Verschiedene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem EnCN erhielten im vergangenen Jahr Rufe und persönliche Auszeichnungen oder wurden in Expertengremien berufen. Die Wichtigsten sind zusammengefasst in Tabelle 4. Wir gratulieren herzlich!

Tabelle 3: Rufe und persönliche Auszeichnungen am EnCN im Jahr 2020

Name	Beschreibung
Prof. Veronika Grimm	Berufung als „Wirtschaftsweise“ in den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung
Prof. Karsten Müller	Ruf an die Universität Rostock als Leiter des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik
Prof. Jacob Albert	Ruf an die Universität Hamburg als Professor für Technische Chemie, insb. Reaktionskinetik mikro- und nanoskaliger Materialien

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	Koordinator	Kurzbeschreibung
SFB/Transregio 154 Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken	Prof. Alexander Martin	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.
LOHC-Zugprojekt am HI ERN	Prof. Peter Wasserscheid	Nachdem im Januar zunächst ein Vorprojekt gestartet wurde, erhielt das HI ERN den Förderbescheid vom StMWi, in den kommenden 5 Jahren in einem Demonstrationsprojekt einen LOHC-betriebenen Zug zu entwickeln. Hierfür greift das HI ERN auch auf Vorarbeiten aus dem EnCN zurück.
Kopernikus Ensure	Prof. Matthias Luther	
Kopernikus P2X	Prof. Peter Wasserscheid	

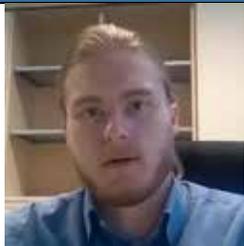
Nachwuchsförderung

EnCN-Energiepreis

Der 2017 ins Leben gerufene und mit insgesamt 3.000 € dotierte EnCN Energiepreis wurde auch 2020 wieder während der Jahreskonferenz verliehen. Der Vorstandsvorsitzende des EnCN e.V. Christian Zens zeichnete insgesamt 6 Abschlussarbeiten aus verschiedenen Forschungsbereichen des EnCN mit je 500 € aus. Der vom EnCN e.V. ausgelobte Preis prämiiert herausragende Abschlussarbeiten (Bachelor und Master), die im Umfeld des EnCN angefertigt wurden. Inhalte von förderungswürdigen Beiträgen sind neue Energietechnologien, rationelle Energienutzung und Effizienzsteigerung, Entwicklung umsetzbarer Anwendungen und Erhöhung der Sicherheit und/oder Anwendungsfreundlichkeit neuer Technologien.

In diesem Jahr wählte die Jury aus den insgesamt 29 Bewerbungen 6 Preisträger aus den unterschiedlichen Forschungsbereichen des EnCN aus. Die thematische Vielfalt der ausgezeichneten Arbeiten – von chemischer Verfahrenstechnik über Elektrotechnik bis hin zu mathematischer Modellierung – dokumentiert eindrucksvoll die Breite der Forschung am EnCN

Tabelle 5: Preisträger des EnCN-Energiepreis 2020

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit	
Christian Köbler	Effizienz	Carrier-Based Pulse Width Modulation Techniques for Dual Three-Phase Motor Drives	
Steffen Leimbach	Speicher	Hydrodynamic studies of a trickle-bed reactor by means of computer tomography	

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit	
Pia Ludwig	Erneuerbare Energie	Investigation of crack formation in monocrystalline silicon photovoltaic modules using electro- and photoluminescence measurements	
Riccarda von der Marwitz	Energiemanagement-Technologien	Isolationssysteme für Leistungselektronik in Luftfahrtanwendungen	
Timo Wagner	Netze	Entwicklung eines digitalen Zwillings für ein Netzgebiet der ESTW AG	
Johannes Wirth	Energiemarktdesign	Möglichkeiten der CO ₂ -Bepreisung in Europa in Ergänzung zum EU-ETS	

Abbildung 12: Energiepreisträger 2020

Kooperation mit dem Schülerforschungszentrum

Der EnCN unterstützt das Nürnberger Schülerforschungszentrum am Willstätter Gymnasium mit einem HiWi zur Betreuung der Schülerforschung. Ausgewählte Schüler hatten auch die Möglichkeit, die EnCN-Jahreskonferenz zu besuchen. Ziel ist es, interessierte Schüler bereits frühzeitig für unsere Forschungsthemen zu begeistern und sie so für ein entsprechendes Studienfach zu motivieren. Es ist auch angedacht, gezielte Forschungspraktika, z.B. im Rahmen von P-Seminaren anzubieten.

Nürnberger Kinderuni am EnCN

Das Kulturreferat der Stadt Nürnberg organisiert die Kinderuni, bei der auch Wissenschaftler aus dem EnCN ihre Forschungsthemen kindgerecht präsentieren. Insgesamt fanden 2020 vier Vorlesungen aus der Kinderuni am EnCN statt.



Abbildung 13: Kinderuni im EnCN

Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit

Jahreskonferenz

Am 10. Dezember fand die Jahreskonferenz – aufgrund der Corona-Pandemie – erstmals online statt. Im ersten, internen Teil hatte insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs am EnCN Gelegenheit, in sechs parallelen Vortragsessions aktuelle Forschungsarbeiten vorzustellen. Im öffentlichen Teil der Konferenz wurde der diesjährige Gastvortrag von Reinhold Achatz, Geschäftsführer der thyssenkrupp Transrapid GmbH gehalten. Er beleuchtete die Möglichkeiten zur Einbindung der Stahlindustrie in das Energiesystem der Zukunft. Dabei zeigte anschaulich, welche entscheidende Rolle Wasserstoff, aber auch Power-to-X Technologien im zukünftigen Energiesystem spielen werden. Prof. Jürgen Karl zeigte, daran direkt anschließend, Wege zur Dekarbonisierung energieintensiver Industrieprozesse auf und Prof. Wolfgang Schlüter erläuterte, wie man mit Innovation zu mehr Energieeffizienz in der Gussindustrie kommen kann. Aus allen Vorträgen wurde deutlich, dass grüner Wasserstoff eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung von Industrieprozessen spielt, aber auch ein zunehmend intensiveres Prozessverständnis aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung. Ein wesentliches Kriterium zur zukünftigen Wirtschaftlichkeit vorgestellter Lösungen bildet eine angemessene CO₂-Bepreisung.

Zum Abschluss der Konferenz gab die Wirtschaftsweise Prof. Veronika Grimm Einblicke in die volkswirtschaftliche Dimension und stellte Auszüge aus dem aktuellen Gutachten des Sachverständigenrates vor. Alle Vorträge der Online-Konferenz wurden aufgezeichnet und stehen auf EnCN-YouTube Kanal zur Verfügung.

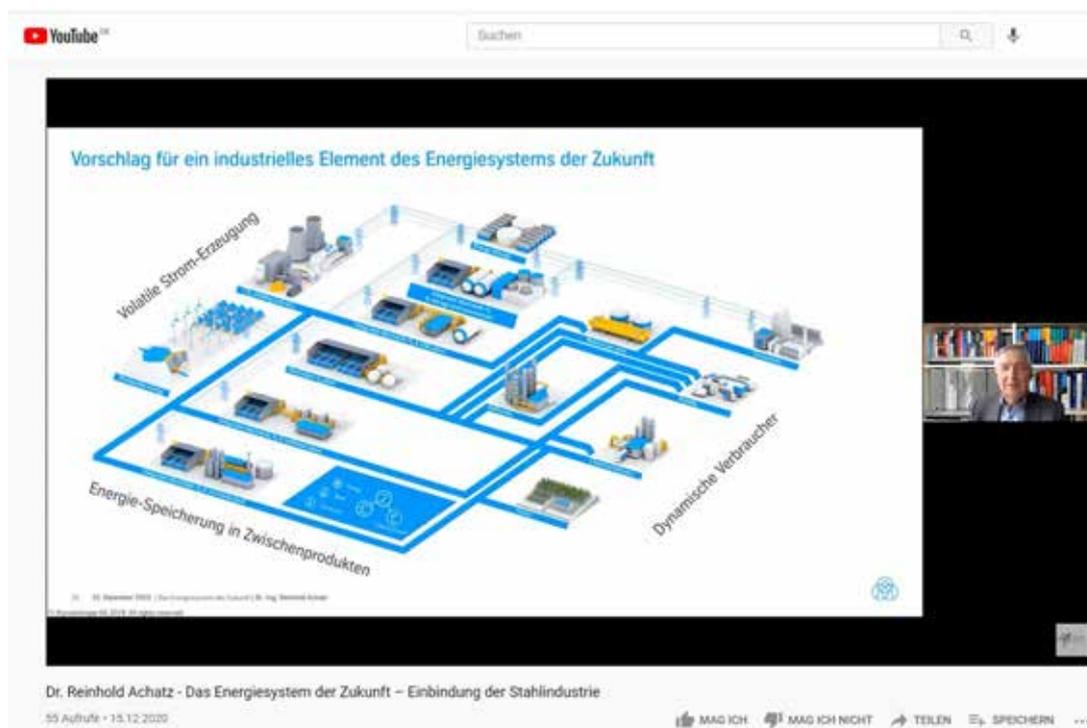


Abbildung 14: Ausschnitt des Online-Vortrags von Dr. Reinhold Achatz auf EnCN Youtube Channel

Um die Veranstaltung für alle Teilnehmer und Interessierte zu dokumentieren haben wir ein visuelles Protokoll der Jahreskonferenz erstellt, in dem man die gesamte Konferenz nochmal im Zeitraffer nachverfolgen kann.



Abbildung 15: Bildprotokoll zur Jahreskonferenz

EnCN- Sommerfest

Größere Präsenzveranstaltungen, die auch einen direkten Austausch der Teilnehmer erlauben waren 2020 aufgrund der Pandemie kaum möglich. Um den EnCN-Wissenschaftlern dennoch eine Möglichkeit zu bieten, sich auch abseits des Forschungsalltags treffen und austauschen zu können fand das diesjährige Sommerfest in Form einer Open-Air-Kinoveranstaltung statt. Unter freiem Himmel auf dem AEG-Areal war so ein Corona-konformes Zusammenkommen und Netzwerken möglich.



Abbildung 16: Kinoabend im Hof Auf AEG

Weitere Veranstaltungen

In unterschiedlichen Veranstaltungsformaten adressiert der EnCN aktuell relevante Themen für unterschiedliche Zielgruppen. So fanden 2020 unter anderem verschiedene Fachveranstaltungen in Kooperation sowie Informationsveranstaltungen aus der Reihe „Faszination Energie“ statt.

Tabelle 6: Termine aus der Veranstaltungsreihe „Faszination Energie“

Termin	Veranstaltung	Titel
24.06.	Faszination Energie	Ask me Anything – Energie und Wasserstoff
14.10.	Faszination Energie	Ask me Anything – Energie und PV

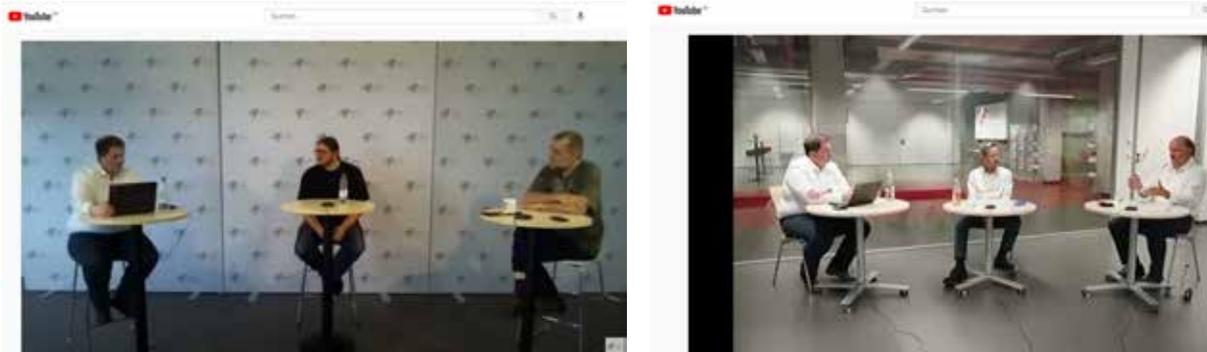


Abbildung 17: Online Mitschnitt Ask me Anything – Wasserstoff Talk (links) und Energie und Sonne (rechts)

Besucher am EnCN 2020

- 15.01. Delegation aus Korea
- 21.01. Delegation aus Korea
- 22.01. Delegation aus China
- 06.02. Besuch von Seminarteilnehmern des TÜV Rheinland
- 30.07. Besuch von Dr. Stefan Kaufmann, MdB (Innovationsbeauftragter grüner Wasserstoff der Bundesregierung)



Abbildung 18: Besuch Dr. Stefan Kaufmann (links) und Seminarteilnehmer TÜV Rheinland (rechts)

Materialien für die Öffentlichkeitsarbeit

Bilderserie

Auch in diesem Jahr wurden weitere Bilder zum Thema „Ich bei der Arbeit“ erstellt.



Abbildung 19: Bilderserie „Ich bei der Arbeit“



Abbildung 20: Druck von Face Shields (links), Fotoaufnahmen Projekt Fassade³ in Kitzingen (mitte) und Laminieren von Solarmodulen (rechts)

Projektbeschreibungen für EnCN-Website

Die im EnCN durchgeführten Kooperationsprojekte sind beste Beispiele für eine praxisorientierte Forschung. Sie zeigen, wie erfolgreich der EnCN mit Unternehmen aus der Region zusammenarbeitet. Um dies auch Außenstehenden besser vermitteln zu können wurden erweiterte Projektbeschreibungen erstellt, die einen umfassenden Überblick über die Forschungsinhalte und deren Umsetzung geben.

Projektinformation

PROJEKT Fassade³

Das Verbundprojekt Fassade³ umfasst den EnCN und Partner der industriellen, vorgefertigten Baubranche, die mehrere Funktionen erfüllt. Organische Photovoltaik dient der Stromerzeugung – stellt weitere gestapelte Stromschichten als Schutzschichten und fertige Bauelemente dar. Die organische, stabile, hochtransparente Bauelemente sind die Aufbaumaterialien und gleichzeitig einen hohen Tageslichtanteil ermöglichen. Insgesamt besteht es aus intelligenten Bauelementen, die für Energieeffizienz des gesamten Gebäudes sind.

Projektziele (2017 – 2022)

Wissenswertes

Die Fassade übernimmt die Aufgabe der Gebäudedämmung, die mit Solarzellen (OPV) und Photovoltaik (PV) in Kombination mit Stromerzeugung als Energieeffizienz der Fassade verbunden werden können.

Das Verbundprojekt Fassade³ ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem EnCN und der Industrie. Die Fassade³ ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem EnCN und der Industrie. Die Fassade³ ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem EnCN und der Industrie.

Die Baugruppe ist ein Kooperationsprojekt

1. Baugruppe- und Fertigungsphase
2. Baugruppenphase
3. Baugruppenphase

Forschungsinhalte

- Wie kann ein Bauelement für die Fassade mit integrierter gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIP) als Bauelement für die Fassade in der Baugruppe?
- Welche Materialien und Verfahren sind notwendig, um eine gebäudeintegrierte Bauelemente für die Fassade zu entwickeln?
- Wie kann ein Bauelement für die Fassade mit integrierter gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIP) als Bauelement für die Fassade in der Baugruppe?

Baugruppe Fassade

Zwei Baugruppen für die Fassade sind im Rahmen des EnCN in diesem Projekt zu realisieren:

- Technische Bauelemente (GIP) – Bauelement für Energieeffizienz (GIP) der Bauelemente und der Fassade
- Technische Bauelemente (GIP) – Bauelement für Bauelemente in der Baugruppe
- 200 Quadratmeter Fläche der Fassade mit GIP in der Baugruppe

Wie kann ein Bauelement für die Fassade mit integrierter gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIP) als Bauelement für die Fassade in der Baugruppe?

Bei der Entwicklung der Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe zu entwickeln. Die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe.

Baugruppenphase

Die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe. Die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe.

Baugruppenphase

Die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe. Die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe sind die Bauelemente für die Fassade in der Baugruppe.



Abbildung 21: Beispiel einer Projektbeschreibung

Videos

Bedingt durch die Corona-Maßnahmen wurden zahlreiche EnCN Veranstaltungen in den digitalen Raum verlegt. Die Teilnehmer konnten über die Plattform Zoom die Veranstaltung live mitverfolgen und diskutieren. Von den Referenten freigegebene Aufzeichnungen stehen auf dem EnCN Youtube Kanal zur Verfügung.

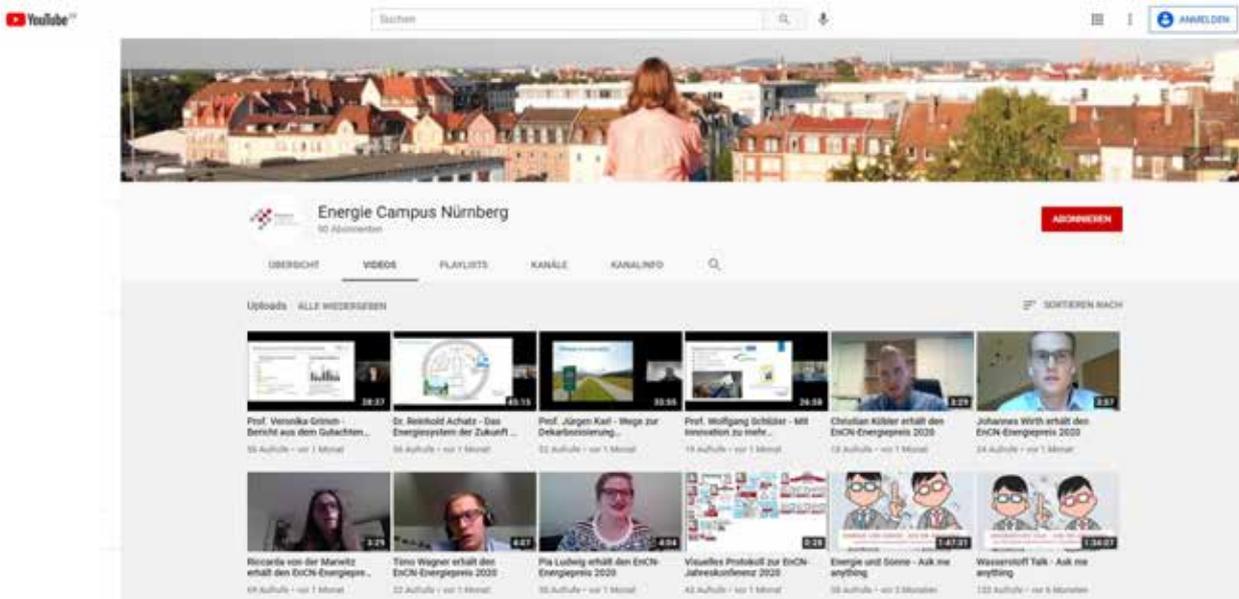


Abbildung 22: Ausschnitt EnCN Youtube Kanal

Weiterhin wurde im Rahmen eines Demonstrationsprojekts ein Video für einen Zeppelin erstellt, der mit Hilfe von Solarmodulen aus der Solarfabrik der Zukunft fliegen kann.



Abbildung 23: Videoausschnitt zum Zeppelin

Neue EnCN Broschüre

Die neu aufgelegte EnCN Broschüre stellt die Forschungskompetenzen, Möglichkeiten für Kooperationen und die Nachwuchsförderung am EnCN übersichtlich und komprimiert dar. Die drei Forschungsschwerpunkte werden näher vorgestellt und mit Beispielen besonders wichtiger und wegweisender Projekte hinterlegt.



Abbildung 24: Ausschnitt EnCN Broschüre

EnCN-Jahreskalender

Der diesjährige Kalender stand unter dem Motor „Energieforschung ins Licht gerückt“. Dazu wurden technische Infrastruktur oder Produkte in den Focus genommen und durch farbiges Licht in Szene gesetzt.



Abbildung 25: Beispielbilder aus dem Kalender

EnCN Netzwerk

Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B)

In Kooperation mit dem in den Räumen des EnCN angesiedelten H2.B wurde 2020 ein gemeinsamer Workshop zum Thema Wasserstoffsicherheit sowie der NUEdialog durchgeführt.

EnCN Fellowship Programm

Zahlreiche EnCN-Wissenschaftler und insbesondere am EnCN ausgebildete Nachwuchswissenschaftler setzen ihre wissenschaftliche Karriere an anderen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland fort. Um den Kontakt mit ihnen zu halten, können diese als „Rising Stars“ ins Fellowship Programm aufgenommen werden. Aber auch Wissenschaftler, die nicht zuvor am EnCN tätig waren und einen engen inhaltlichen Austausch in Forschungsprojekten mit dem EnCN anstreben, können als „Fellows“ in das Programm aufgenommen werden.

Tabelle 7: EnCN Rising Stars und Fellows

	Name	Position/Forschungsinstitut
Rising Stars	Prof. Jakob Albert	Professor für Technische Chemie insb. Reaktionskinetik mikro- und nanoskaliger Materialien an der Universität Hamburg
	Prof. Gunnar Grün	Professor für Bauphysik an der Universität Stuttgart
	Prof. Karsten Müller	Leiter des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik an der Universität Rostock
	Dr. Lars Schewe	Lecturer in Operational Research an der School of Mathematics der University of Edinburgh
	Prof. Martin Schmidt	Professor für Nichtlineare Optimierung an der Universität Trier
	Prof. Christian Weindl	Professor an der Hochschule Coburg, Fachgebiet Elektrische Netze und Speicherintegration
Fellows	Dr. Harry van der Weijde	Lecturer an der School of Engineering der University of Edinburgh
	Prof. Miguel Anjos	Chair of Operational Research an der School of Mathematics der University of Edinburgh

Ausblick 2021

10-jähriges Jubiläum

2021 jährt sich die Gründung des EnCN zum zehnten Mal. Das gibt Anlass zur Freude und zum Feiern! Dies werden wir auch gemeinsam mit unseren Partnern und Unterstützern tun – wenn möglich vor Ort, wenn Corona es zulässt.

Vorbereitungen für 2022+

Die zweite Förderphase endet planmäßig zum Jahresende 2021. Eine der Hauptaufgaben in diesem Jahr wird darin bestehen, die im Evaluationsbericht angelegten Maßnahmen und Initiativen so vorzubereiten, dass der EnCN ab 2022 auf einem soliden Fundament weitergeführt werden kann.

GESCHÄFTSSTELLE

Projektbericht 2020

Zur Koordination ihrer Aktivitäten und zur Unterstützung der 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. Das Dach ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik., repräsentiert den EnCN nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Das Dach wird bei seiner Öffentlichkeitsarbeit vom Förderverein EnCN e.V. unterstützt und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.



Aus dem Alltag der Geschäftsstelle

KONTAKT

Dr. Alexander Buchele
Geschäftsführer



E-Mail
Alexander.Buchele@encn.de

Telefon
+49 911 / 56854 9120

Web
www.encn.de

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

1 Aktivitäten der Geschäftsstelle

1.1 Unterstützung der Forschungsaktivitäten

Eine der wesentlichen Aufgaben der Geschäftsstelle besteht derzeit darin, die Wissenschaftliche Leitung bei der Weiterentwicklung der Fortführungsstrategie des EnCN über die zweite Förderphase hinaus zu unterstützen. 2020 lag der Fokus dabei auf der Erstellung des Evaluationsberichts. Die Geschäftsstelle unterstützt darüber hinaus die Aktivitäten in den einzelnen Forschungsbereichen vor allem im organisatorischen Bereich und durch Förderung der Vernetzung, Kontaktvermittlung zu externen Projektpartnern und beim Betrieb der Infrastruktur.

Koordination Evaluationsbericht

Die Erstellung des am 01.10. vorgelegten Evaluationsbericht wurde von der Geschäftsstelle federführend organisiert und koordiniert. Der Bericht beinhaltet sowohl einen Ergebnisteil als auch ein Strategiekonzept für die Fortführung des EnCN ab dem Jahr 2022. Hauptaufgaben waren dabei die Erstellung wesentlicher Inhalte, die Zusammenführung und Konsolidierung der Zuarbeiten aus den Forschungsbereichen sowie die Abstimmung des Berichts mit den Institutionsleitungen unter Sicherstellung der Abgabefrist.



Abbildung 1: Evaluierungsbericht 2020

Corona-konformer Geschäftsbetrieb am EnCN

Zahlreiche Forschungsarbeiten am EnCN sind von regelmäßigem Zugang zu Labors und Technika abhängig. Zur Sicherstellung der Arbeitsfähigkeit aller Forschungsbereiche, auch unter Pandemiebedingungen, hat die Geschäftsstelle in Abstimmung mit der Wissenschaftlichen Leitung ein Hygienekonzept erstellt und umgesetzt. Die Geschäftsstelle selbst ist mit einem kombinierten Home-Office/Präsenzkonzept durchgängig besetzt, um jederzeit einen zentralen Ansprechpartner im Gebäude zu haben. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, notwendige Präsenztermine unter Einhaltung der Regularien durchzuführen. Für die Durchführung der jetzt vermehrt stattfindenden Online-Besprechungen wurde zentral Equipment angeschafft, das von allen im EnCN genutzt werden kann.

Unterstützung Forschungsinfrastruktur

Die Projekte Speicher A und Speicher B haben für die zweite Förderperiode ein gemeinsames Speichertechnikum (Speicherhaus) eingerichtet, in dem dann die in den Anträgen beschriebenen Technologien im Technikumsmaßstab betrieben werden. Das Speicherhaus soll auch Besuchern einen kompakten Überblick über die erforschten Speichertechnologien und deren Anwendungsfelder geben. Der von der Geschäftsstelle koordinierte Ausbau der technischen Infrastruktur wurde 2020 fertiggestellt. Darüber hinaus hat die Geschäftsstelle verschiedene kleinere Infrastrukturmaßnahmen im Bereich Lüftung und Wasserversorgung für die Projekte Effizienz und EET koordiniert.



Abbildung 2: Speicherhaus Gebäude 13

Vernetzung mit externen Projektpartnern

Die Geschäftsstelle koordinierte verschiedene Aktivitäten und Workshops, um EnCN-Wissenschaftler in Austausch mit potentiellen Projektpartnern zu bringen. Die seit 2014 bestehende Kooperationsvereinbarung zwischen der N-ERGIE und dem EnCN wurde verlängert. Aus dieser Rahmenvereinbarung hat sich im Dezember ein erstes Projekt zum Technologiescreening von Wasserstoff-Technologien ergeben. Die 2019 mit Cenero gestarteten Gespräche für die gemeinsame Projektierung und Planung eines Wärmenetz 4.0 auf dem AEG-Nordareal wurden erfolgreich weitergeführt. Ende 2020 wurde ein gemeinsamer Antrag bei der BAFA eingereicht. Die Geschäftsstelle unterstützte die Projektentwicklung mit ihren Kontakten zu kommunalen Einrichtungen und zur N-ERGIE und bei der Einholung von LOIs. Über dieses Projekt hinaus hat sich mit Cenero ein weiterer Ansatz zur Erprobung neuer Ansätze im Bereich elektrischer Netze auf dem AEG-Südareal ergeben. Solar Edge baut seine Deutschland-Repräsentanz in Nürnberg auf. Hier gab es erste Gespräche zu möglichen Kooperationen, insbesondere in den Bereichen PV und Elektromobilität. Über die bestehende Verbindung zum NCP Wallonien fand ein Austausch zu Kooperationsmöglichkeiten im Bereich Wasserstoff und Elektrolyse statt. Ebenfalls Interesse an Kooperation in den Bereichen Effizienzsteigerung und Wasserstofftechnologien hat der Kraftwerksstandort Gebersdorf von Uniper. Hier fand im Oktober ein erster Austausch statt, der 2021 fortgesetzt werden soll.

Tabelle 1 – Vernetzungsaktivitäten für EnCN Wissenschaftler

Datum	Aktivität	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
01-12/20	Cenero, Wärmenetz 4.0 – AEG-Nordgelände	Prof. Jürgen Karl, Speicher Prof. Martin März, Energiemanagement-Technologien
07.07.	EnCN-Kooperation mit Solar Edge	Prof. Christoph Brabec, Erneuerbare Energien Prof. Armin Dietz, Effizienz
09/20	Verlängerung Rahmenvertrag mit N-ERGIE	Offen für alle Beteiligten im EnCN
29.09.	H2-Elektrolyse Demonstration in Brügge/Belgien	Prof. Peter Wasserscheid, Speicher
09-12/20	Cenero, Reallabor AEG-Südgelände	Prof. Matthias Luther, Netze Prof. Martin März, Energiemanagement-Technologien
14./27.10.	Uniper, Effizienzmaßnahmen für Kraftwerk Franken	Prof. Veronika Grimm, Energiemarktdesign Prof. Peter Wasserscheid, Speicher
12/20	N-ERGIE Studie H2-Technologien	Prof. Jürgen Karl, Speicher

EnCN-Sommerfest

Aufgrund der corona-bedingten Rahmenbedingungen war eine ganztägige Präsenzveranstaltung wie in den Vorjahren nicht möglich. Um den Mitarbeitern am EnCN trotzdem eine Möglichkeit zum persönlichen Austausch und „Social-Networking“ zu geben organisierte die Geschäftsstelle eine gemeinsame Open-Air Kinovorstellung.



Abbildung 3: Sommerfest

1.2 EnCN-Energiepreis

In Zusammenarbeit mit dem EnCN verlieh der EnCN e.V. 2019 wieder den Energiepreis. Der Preis ist mit insgesamt 3.000 € dotiert und wird für exzellente Abschlussarbeiten aus dem Umfeld des EnCN vergeben. Insgesamt wurden 6 Arbeiten prämiert.

Die Geschäftsstelle hat gemeinsam mit der e.V.-Geschäftsstelle die administrativen Aufgaben rund um den Preis übernommen, die Ausschreibungsunterlagen erstellt, Bewerbungen gesammelt und gesichtet und die Juryarbeit begleitet. Die Ausschreibung für 2020 läuft bereits.

1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Veranstaltungen

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit war der EnCN 2020 auf einigen Veranstaltungen aktiv.

- E-World Energy & Water: Messestand
- Jahreskonferenz mit Verleihung des EnCN-Energiepreises

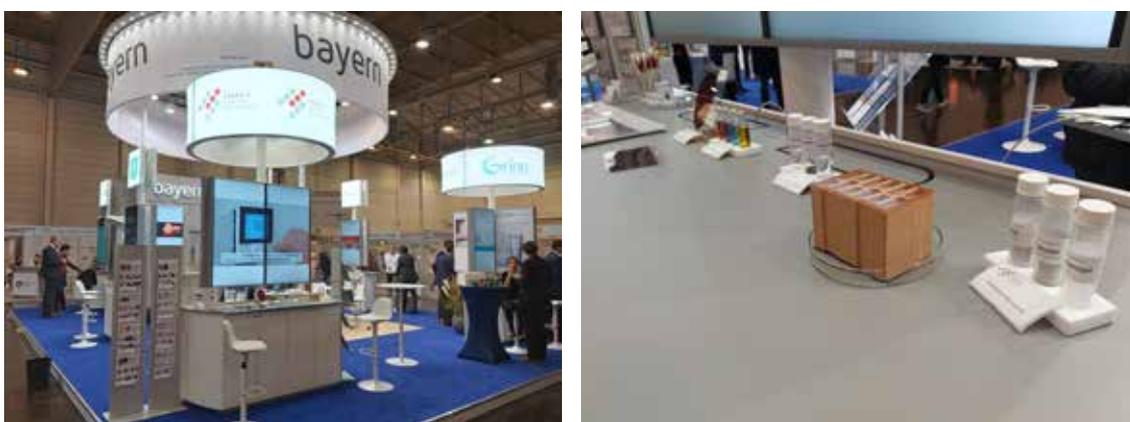


Abbildung 4: Ausstellungsstand zur e-World mit Beispielen aus der Forschung



Abbildung 5: Videoausschnitt aus einem Vortrag zur Jahreskonferenz

Darüber hinaus stand in diesem Jahr vor allem die Entwicklung digitaler Veranstaltungsformate im Fokus, um auch in Corona-Zeiten Kontakt mit dem EnCN-Netzwerk zu halten.

Faszination Energie

Im Rahmen der Veranstaltungsreihe für die interessierte Öffentlichkeit wurden zwei Termine im „Ask me Anything“-Format zu den Themen Wasserstoff und PV durchgeführt. Beide Veranstaltungen sind im Youtube-Kanal des EnCN verfügbar.



Abbildung 6: Titelbilder der Veranstaltungsreihe „Ask me Anything“

Fotoserie „Forschung im rechten Licht“

In der EnCN-Forschung kommt häufig spezielle und hochentwickelte Forschungsausstattung zum Einsatz. Viele unserer technischen Anlagen sind Eigenentwicklungen und wurden speziell für unsere Forschung konzipiert und aufgebaut. Im Rahmen eines Fotoprojekts haben wir verschiedene Installationen ins rechte Licht gerückt und geben ihnen so einen angemessenen Auftritt. Diese Bilder werden für die Öffentlichkeitsarbeit in den jeweiligen Forschungsbereichen genutzt. Der EnCN-Jahreskalender „Faszination Energie“ zeigt eine Auswahl der Bilder.

1.4 Organisation

Das „DACH“ des EnCN besteht aus 4 Mitarbeitern: dem Geschäftsführer Dr. Alexander Buchele, der Assistentin Ioanna Dimopoulou, dem Gebäudemanager Wolfgang Schlaffer und der Projektmanagerin Kristin Zeug. Zusätzlich unterstützen 2-3 wechselnde studentische Mitarbeiter die Arbeit der Geschäftsstelle. Aus organisatorischer Sicht ist es dringend eine Nachfolge für die Trägerschaft der Geschäftsstelle gefunden werden, da am ZAE ab 2022 keine Möglichkeit mehr dazu besteht.



Abbildung 9 - Mitarbeiter der Geschäftsstelle Energie Campus Nürnberg

2 Schlussworte

Die wichtigsten Aktivitäten der Geschäftsstelle im Jahr 2020 waren die Koordination des Evaluationsberichts sowie verschiedene Maßnahmen rund um Corona, insbesondere die Sicherstellung der Arbeitsfähigkeit des EnCN und die Entwicklung geeigneter Veranstaltungsformate. So ist es trotz der Pandemie gelungen, einen regelmäßigen Austausch im EnCN-Netzwerk zu gewährleisten.

Die im Jahresbericht dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass die zweite Förderperiode gut läuft und die Corona-Pandemie nur geringe Auswirkungen auf die Arbeitsfähigkeit in den verschiedenen Forschungsbereichen hat. Ende des Jahres 2021 endet auch die zweite Förderperiode des EnCN. Die im Strategiekonzept des Evaluationsberichts dargestellten Maßnahmen müssen zeitnah und verbindlich aufgegleist werden, um eine lückenlose Weiterführung des EnCN über 2021 hinaus sicherzustellen.

3 Veranstaltungen und Presse

3.1 Veranstaltungen am EnCN

Datum	Veranstaltungstyp	Titel
13.1.	Vortrag	Wissenschaft auf AEG
14./15.1.	Plenarsitzung	EU-Meeting Light-Coce
15.1.	Besuch	Delegation Korea
21.1.	Besuch	Delegation Korea
22.1.	Besuch	Delegation China
22.1.	Workshop	Netzwerktreffen H2.B
28.1.	Workshop	Netzwerktreffen H2.B
28.1.	Workshop	Energieeffiziente Quartiere
29.1.	Workshop	Reallabore für die Energiewende
6.2.	Besuch	Delegation TÜV Rheinland
9./10.2.	Workshop	Monitoring Kommission BMWi
10.-12.2.	Messe	e-world energy&water
20.2.	Workshop	Monitoring Kommission BMWi
24.2.	Vortrag	Kinderuni
25.2.	Vortrag	Kinderuni
27.2.	Vortrag	Kinderuni
28.2.	Vortrag	Kinderuni
4./5.3.	Fachtagung	Generative Fertigungsprozesse
27.5.	Seminar	Energie.Digital: Einsatzfelder von Virtual und Augmented Reality im Energiesektor
24.06.	Online	Ask me Anything: Energie und Wasserstoff
30.6.	Online	Bürgerdialog Stromnetz (Impulsvortrag Zellularer Ansatz)
16.7.	Online	Workshop Wasserstoff-Sicherheit
30.7.	Besuch	Dr. Kaufmann, MdB
22.9.	Online	Bürgerdialog Stromnetz (Impulsvortrag Wasserstoff)
30.9.	Workshop	Projekttreffen InnoProSys
14.10.	Online	Ask me Anything: Energie und PV
18.11.	Konferenz	NUEdialog 2020 - Zukunft Wasserstoff
2.12.	Seminar	Regenerative Energien und Kältetechnik
7.-9.12.	Konferenz	next generation solar energy conference
10.12.	Online	EnCN-Jahreskonferenz
15.12.	Workshop	Energie.Digital: Simulationen und virtuelle Zwillinge als Wegbereiter der Energiewende

3.2 Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten sowie dessen Forschungsthemen und Veranstaltungen waren 2020 mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse.

Datum	Quelle	Titel
31.01.	Bayerische Staatszeitung	Der Transport des hochexplosiven Gases ist inzwischen zur Glaubensfrage mutiert
27.02.	Handelsblatt online	Veronika Grimm und Monika Schnitzer
27.02.	Handelsblatt	Veronika Grimm und Monika Schnitzer
05.03.	Bayerische Gemeindezeitung	Für eine klimafreundliche Energieversorgung:
03.04.	Fränkischer Tag	Wirtschaft
03.04.	Fränkischer Tag	Expertenrat
03.04.	Bayerische Staatszeitung	Zukunftsfähige Wirtschaftsweise
11.04.	Nürnberger Nachrichten	Im höchsten Zirkel angelangt
11.04.	Nürnberger Zeitung	Nürnberger Professorin Grimm
28.05.	Nürnberger Zeitung	Erneuerbare Energien auf dem Prüfstand
30.05.	Nürnberger Zeitung	"Energieträger der Zukunft"
02.06.	Nürnberger Nachrichten	Warum Strompreise steigen
05.06.	Bayerische Staatszeitung	Wie Bayerns Ökoenergie der Zukunft aussieht
11.06.	Nürnberger Nachrichten	Standortfrage
18.07.	Bayerische Rundschau	Antrieb von morgen: Bayern investiert Millionen in die Brennstoffzelle
05.08.	Nürnberger Zeitung	Der neue Innovationsbeauftragte der Bundesregierung tourt durch Deutschland
05.08.	Nürnberger Nachrichten	"Mister Wasserstoff"
29.08.	Nürnberger Nachrichten	Mehr Platz für Forschung
29.08.	Nürnberger Zeitung	Die Technische Hochschule bekommt auf dem AEG-Gelände einen Neubau
13.11.	Nürnberger Stadtanzeiger	Zuversicht in der Krise
24.11.	Mittelbayerische Zeitung	Nürnberg ist Wasserstoff-Hauptstadt
04.12.	Nürnberger Stadtanzeiger	N-Kubator

FORSCHUNGSBEREICH

Effizienz



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar
Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik

E-Mail
Wolfgang.Krcmar@encn.de

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

Web
www.encn.de/effizienz

EFFIZIENZ

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
HSA - Hochschule Ansbach; Fakultät Technik	TP1: Energieeffiziente Gebäudehülle; Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Gallwitz, Prof. Dr. Grün, Prof. Dr. Kießling, Prof. Dr. Krcmar
THN - Technische Hochschule Nürnberg; Fakultät Maschinenbau / Versorgungstechnik / Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)	TP2: Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen; Prof. Dr. Kremser
THN - Technische Hochschule Nürnberg; Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	TP3: Energieeffiziente Ansteuerkonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme; Prof. Dr. Dietz
THN - Technische Hochschule Nürnberg; Fakultät Informatik	TP4: User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben; Prof. Dr. Schlüter
THN - Technische Hochschule Nürnberg; Fakultät Werkstofftechnik	

Projektbericht 2020

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 daher eine tragende Säule der Energiewende.

Im Teilprojekt „Energieeffiziente Gebäudehülle“ werden Baustoffe durch neuartige Effekte energieeffizienter ausgerüstet. Außerdem erfolgt die konstruktive Entwicklung energieadaptiver, modularer Technikfassaden unter Berücksichtigung neuer Stromversorgungskonzepte und Bilanzierungsmethoden. Teilautarke Fassadensysteme mit integrierter organischer gedruckter Photovoltaik werden in der praktischen Anwendung erprobt. Durch den Einsatz eines Flugroboters (Drohne) erfolgt eine interaktive Gebäudevisualisierung. Die Arbeitsgruppe hat mit der Planung, dem Aufbau und Betrieb mit Langzeitmonitoring von 8 Energiespeicherhäusern mit KfW Standard 40 Plus den Beweis erbracht, dass für energieeffiziente Gebäude sowohl die passiven, als auch die aktiven Komponenten notwendig sind und aufeinander abgestimmt sein sollten. In den Teilprojekten „Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen“ und „Energieeffiziente Ansteuerkonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme“ werden neue Konzepte für Motoren und Antriebsstränge sowie deren Betriebsführung entwickelt. Im Teilprojekt „User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben“ werden messtechnisch ermittelte Energiedaten in einem maßgeblichen Bereich der energieintensiven Industrie zu Kennzahlen verdichtet und nutzerbezogen ausgewertet und visualisiert.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar

Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik



E-Mail

Wolfgang.Krcmar@encn.de

Telefon

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

Web

www.encn.de

1 Energieeffiziente Gebäudehülle

Im Teilprojekt 1 „Energieeffiziente Gebäudehülle“ sind Professoren und ihre Mitarbeiter aus vier Fakultäten der TH Nürnberg vernetzt und arbeiten gemeinsam an der Weiterentwicklung energieeffizienter Gebäudehüllen. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den einzelnen Unterprojekten vorgestellt.

1.1 Entwicklung und Ausrüstung neuer, höchstwärmedämmender Baustoffe mit verminderter Wärmeleitfähigkeit; Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Werkstofftechnik; Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“, Prof. Dr. W. Krcmar

Einleitung

Das Ausmaß der Energieeffizienz eines Gebäudes wird durch zwei wichtige Themenkomplexe geprägt, die beide optimal und nachhaltig wirksam installiert sein sollten. Dabei handelt es sich einerseits um die passiven Komponenten eines Gebäudes, nämlich um eine möglichst hochwärmedämmende Gebäudehülle, die mit geeigneten Werkstoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit aufgebaut sein sollte. Den zweiten wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz leisten die verbauten aktiven Komponenten. Dabei handelt es sich um die technische Gebäudeausrüstung (TGA) mit z.B. regenerativer Stromerzeugung, Energiespeicher und Betriebsweise der Gebäude. Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ unter der Leitung von Prof. Dr. Krcmar erforscht, entwickelt und erprobt neuartige Wandbaustoffe mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften, u.a. Mauerziegel, Mauermörtel, Geopolymere, Innen- und Außenputze sowie nanofaserverstärkte 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 „Energieeffiziente Werkstoffe“ arbeiteten im Berichtszeitraum 6 Doktoranden innerhalb von Forschungsprojekten an ihren Promotionen. Darüber hinaus waren stets ca. 15 Studierende als Wissenschaftliche Hilfskräfte in die Arbeitsgruppe integriert und konnten die erarbeiteten Ergebnisse für ihre Projektarbeiten, Bachelor- und Masterarbeiten nutzen. In der Arbeitsgruppe wurden auch im Jahr 2020 Drittmittel in bedeutender Höhe eingenommen und die nachfolgend genannten Forschungsprojekte abgeschlossen bzw. bearbeitet bzw. neu eingeworben:

- „NanoFIM: Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude – Herstellung, Ausrüstung und Charakterisierung von Massivwandbau- und Dämmstoffen mit Nanofaser-Isolationsmaterialien“; PTJ-FKZ 03SF0543 B; abgeschlossenes Projekt.
- „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Absenkung des Emissionskoeffizienten“; Bilaterale Forschungsarbeiten in Zusammenarbeit mit der europäischen Ziegelindustrie; laufendes Projekt.
- „Ziegel 2020: Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“; PTJ-FKZ 03ET1526 A; laufendes Projekt.
- „LightCoce: Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures“; laufendes EU-Projekt HORIZON 2020.
- „LIFE – Hypobrick: Towards hypocarbonic economy – Development of non-fired building materials based on wastes“; neu angelaufenes EU-Projekt LIFE.
- „Herzo Opt – Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“; PTJ-FKZ 03ET1641 A; laufendes Projekt.

Neu eingeworbene Projekte:

- „Validierung des Herstellungsprozesses von RC-Produkten aus Bau-Reststoffen“; Bayern Innovativ; Kooperationsprojekt mit Prof. Dr. Teipel, Fakultät Verfahrenstechnik der TH Nürnberg; Start ab 3 / 2021.
- „Machbarkeitsstudie zur Herstellung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper durch Hydrothermalsynthese aus Geopolymeren“; Vorlaufforschung der TH Nürnberg; Start ab 4 / 2021.
- „Entwicklung und Erprobung eines innovativen hochporösen mineral-organischen Akustik-Schaums mit optimierter Wärme- und Schalldämmung und verbessertem Brandschutz zur Nutzung für mobile Stellwände und als Innendämmung von Wänden“; ZIM Kooperationsprojekt; TH Nürnberg, Start ab 1 / 2021.

1.1.1 Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude; *Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Werkstofftechnik; M.Eng. N. Wedel, M.Eng. C. Allar und Prof. Dr. W. Krcmar*

Im Projekt „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ (PTJ-FKZ 03SF0543B) erfolgt die Entwicklung und Anwendung neuartiger nanoskaliger Dämmstoff-Komposite aus Polystyrol-Nanofasern und Silica-Aerogelen. Dazu wird von unserem Projektpartner an der Freien Universität Berlin in der Kreislaufwirtschaft anfallendes Alt-Styropor in Lösung gebracht und mittels „Electrospinning-Verfahren“ zu Polystyrol-Nanofasern bzw. -Vliesen versponnen. Die so hergestellten Nanofasern werden im Energie Campus Nürnberg in SiO₂-Aerogele integriert mit dem Ziel, die mechanischen Eigenschaften der Aerogele zu verbessern, ohne deren thermische Eigenschaften negativ zu beeinflussen.

In der Arbeitsgruppe erfolgt die Herstellung der Aerogele in einem dreistufigen Prozess, bestehend aus einem Sol-Gel-Prozess, einer anschließenden Modifikation der Gel-Oberfläche sowie einer abschließenden Trocknung des Gels. Hierzu wurden in den ersten beiden Jahren seit Projektstart mehrere Syntheserouten entwickelt und erprobt. Heute gelingt im Labormaßstab die reproduzierbare Produktion mechanisch stabiler monolithischer Aerogel-Nanofaser-Komposite, die sich durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit von nur $\lambda = 0,020 \text{ W/(mK)}$ und hydrophobe Eigenschaften auszeichnen (Abbildung 1.1).

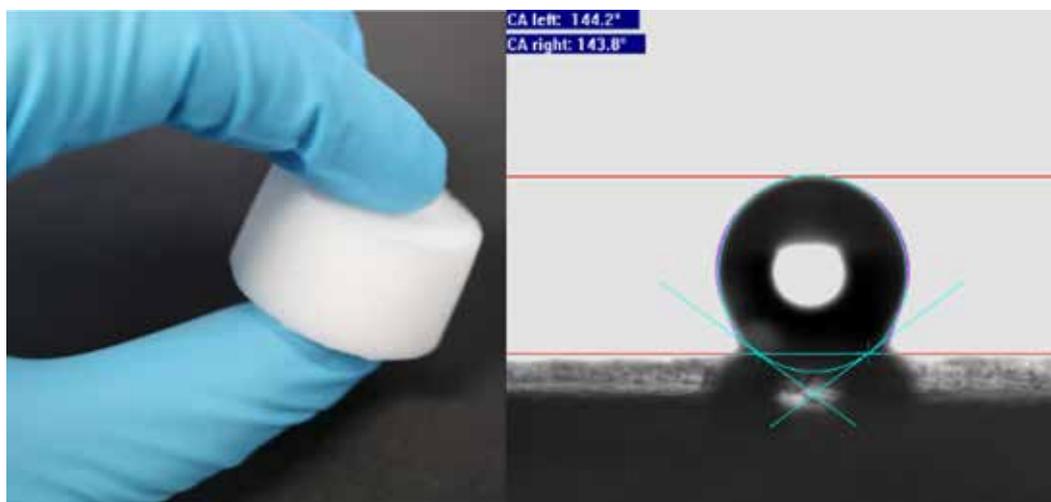


Abbildung 1.1: Durch eine geeignete Syntheseroute gelingt die Herstellung mechanisch stabiler Silica-Nanofaser-Komposite (l). Kontaktwinkelmessungen hydrophobierter Aerogel-Proben zeigen Werte von über 140 ° (r).

Im dritten Projektjahr lag der Fokus der Arbeiten auf der Verbesserung und Optimierung des Trocknungsschrittes, welchen alle Aerogel-Probekörper durchlaufen müssen. Da eine „klassische“ Trocknung der Aerogele durch Evaporation der Gel-Flüssigkeit an Luft zum Kollabieren der Aerogel-Mikrostruktur und somit zur Zerstörung des Gels führt, ist die Trocknung in einem Autoklav notwendig. Dabei wird die Gel-Flüssigkeit (Ethanol) in einem ersten Schritt durch flüssiges CO₂ ersetzt, welches unter Umgehung eines direkten Phasenübergangs von flüssig zu gasförmig zunächst in den überkritischen Zustand (CO₂ liegt ab 31 °C und 73,4 bar überkritisch vor) und erst anschließend in die Gasphase überführt wird. Für diesen Reaktionsschritt wurde in den ersten beiden Projektjahren ein verhältnismäßig einfacher Reaktoraufbau

für die Aerogel-Trocknung mit überkritischem CO₂ verwendet. Dabei handelte es sich um einen Hochdruckbehälter in Doppelmantelausführung, der mit einem Eingangsventil zur Versorgung mit Flüssig-CO₂ sowie mit einem Bodenablassventil zum Spülen des Reaktorinneren ausgestattet war (Abbildung 1.2). Die Temperatur sowie der temperaturabhängige Druck im Inneren des Reaktors konnte manuell eingestellt werden, indem der Doppelmantel mit entsprechend temperierten Flüssigkeiten gespült wurde. Zu Beginn der Aerogel-Trocknung wurden die noch feuchten Gel-Körper in das Reaktorinnere gelegt und mit Ethanol überschichtet. Anschließend fand der Austausch von Ethanol gegen flüssiges CO₂ in mehreren Spülzyklen statt. Nach dem Entfernen des Ethanols wurde das CO₂ durch Temperaturerhöhung in den überkritischen Zustand gebracht und abschließend durch vorsichtiges Entspannen des Überdrucks bei konstanter Temperatur in den Gaszustand überführt.

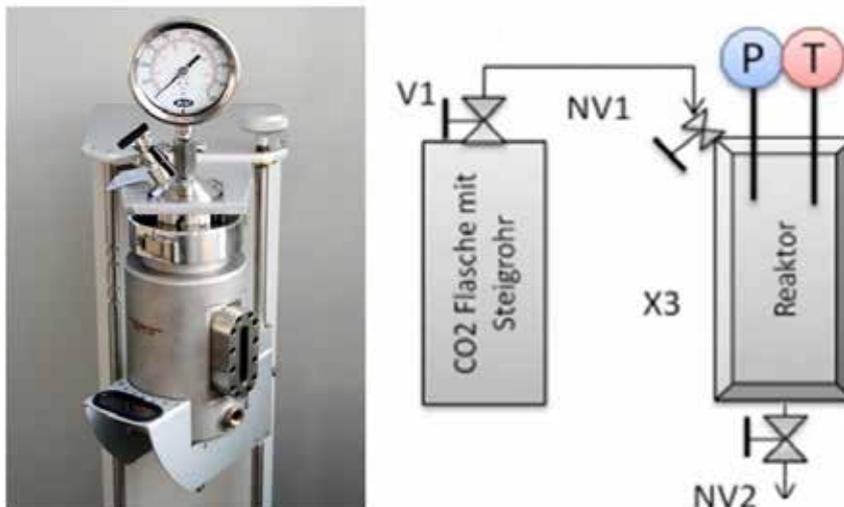


Abbildung 1.2: Hochdruckgefäß zur Trocknung von Silica-Aerogelen mit überkritischem CO₂ (l). Schematische Darstellung des zunächst verwendeten Reaktoraufbaus (r).

Mit Hilfe dieses einfachen Reaktoraufbaus war die Trocknung der hergestellten Silica-Aerogele bereits möglich. Im Verlauf der Arbeiten wurde jedoch festgestellt, dass in mehrerlei Hinsicht Optimierungsbedarf bestand. Zum einen konnte der Austausch von Ethanol durch CO₂ nicht kontinuierlich stattfinden, sondern wurde diskontinuierlich in aufeinander folgenden Austauschzyklen realisiert, bei welchen jeweils neues CO₂ eingeleitet und die entstehende CO₂-Ethanol-Mischung durch ein Bodenablassventil entfernt wurde. Mit jedem nachfolgenden Austauschzyklus wurde stets weniger Ethanol aus dem Reaktorvolumen entfernt, sodass der Reaktor nach acht Austauschvorgängen zwar immer noch nicht vollständig von Ethanol befreit war, durch weitere Austauschzyklen jedoch nur noch unwesentliche Mengen an Ethanol aus dem Reaktor entfernt werden konnten. Zum anderen wurden alle Austauschzyklen zu einem Zeitpunkt durchgeführt, bei dem sich das CO₂ noch nicht im überkritischen Zustand befand und somit nur eine begrenzte Löslichkeit für Ethanol aufwies. Außerdem konnten die Prozessparameter, insbesondere der Reaktordruck, nur in begrenztem Maße bzw. nur indirekt über die Temperatur gesteuert werden. Aufgrund dieser Sachverhalte benötigte ein Trocknungsprozess insgesamt sieben Tage und es verblieben stets kleinste Restmengen an Ethanol in den getrockneten Aerogel-Monolithen, was die Wärmedämmwerte und die hydrophoben Eigenschaften der Proben negativ beeinflusste.

Das Ziel des hier vorgestellten Reaktor-Upgrades besteht in der Beseitigung der oben genannten Probleme. Da seitens der Gerätehersteller keine Systemlösung für ein derartiges Upgrade existiert, wurde ein eigenes Konzept erarbeitet, mit welchem die gesetzten Ziele erfüllt werden können. Das Konzept basiert im Kern auf einer HPLC-Pumpe, welche normalerweise bei der Hochdruck-Chromatographie Verwendung findet. Die Pumpe soll dabei flüssig-CO₂ aus einer Druckflasche entnehmen und so weit verdichten, dass das CO₂ bereits im überkritischen Phasenzustand in das Reaktorgefäß eingeleitet werden kann. Die Mengenregulierung soll dabei über einen externen Massendurchfluss-Detektor erfolgen, welcher der HPLC-Pumpe nachgeschaltet ist. Durch den Anbau eines Überstromreglers an der Ausgangsseite des Autoklavs kann der Reaktorraum kontinuierlich mit definierten Mengen an überkritischem CO₂ gespült und die anfänglich vorhandenen Mengen an Ethanol sukzessive und vollständig aus den im Reaktor befindlichen Aerogel-Probekörpern entfernt werden. Die Pumpe erlaubt im Zusammenspiel mit dem verbauten Überstromregler darüber

hinaus eine sehr genaue Einstellung des Reaktordrucks, bei welchem der kontinuierliche Spülvorgang stattfindet, was das Risiko einer Beschädigung der Aerogel-Körper durch zu schnelle Druckveränderungen minimiert. Eine schematische Darstellung des Upgrades ist in Abbildung 1.3 illustriert. Den fertigen Reaktoraufbau zeigt Abbildung 1.4.

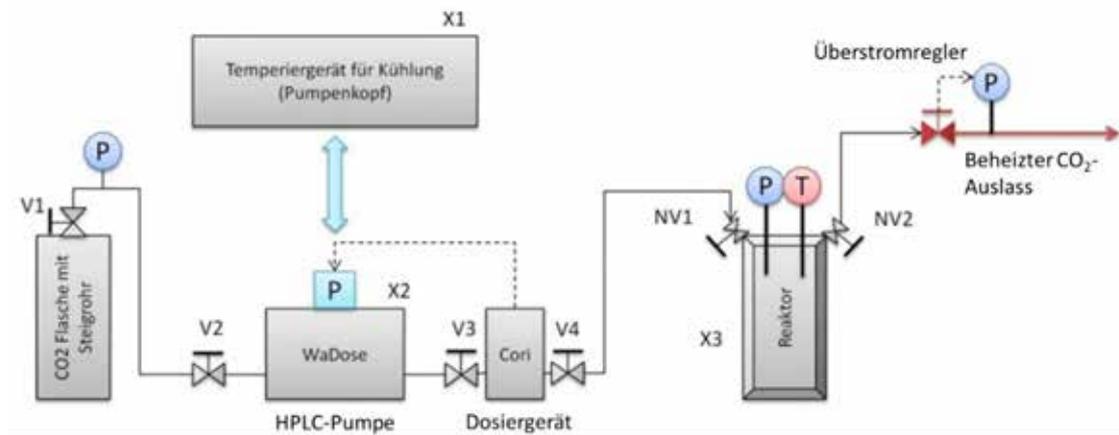


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des Konzeptes für ein Upgrade des Reaktors. Die Verbindung der einzelnen Bauteile erfolgt über druckfeste Edelstahlleitungen. Die Beheizung des Auslassbereiches wurde über eine wickelbare, elektrische Widerstandsheizung realisiert. Aufgrund des hohen Verdichtungsverhältnisses der HPLC-Pumpe, muss diese über einen externen Kreislauf gekühlt werden.



Abbildung 1.4: Gesamtansicht des neuen Autoklav-Aufbaus zur verbesserten Trocknung von Silica-Aerogelen: 1 = Druckgefäß; 2 = Heizkreislauf des Druckgefäßes; 3 = Hochdruckpumpe; 4 = Durchflussmengenregler; 5 = Kühlkreislauf der Hochdruckpumpe; 6 = beheiztes Überströmventil; 7 = Elektrische Widerstandsheizung des Bodenablassventils; 8 = CO₂-Versorgung.

Mit Hilfe dieses Reaktor-Upgrades wird es in Zukunft möglich sein Aerogel-Körper mit noch niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten (Ziel: $\lambda \approx 0,018 \text{ W/(mK)}$) und ausgeprägterer Hydrophobie herzustellen. Aufgrund der Halbierung der benötigten Trocknungszeit, werden die Forscher außerdem in die Lage versetzt, zukünftige Versuchsreihen zur Herstellung der Silica-Aerogele in deutlich kürzeren Zeitabschnitten durchführen zu können.

1.1.2 Auswirkung der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik; Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Werkstofftechnik; B.Eng. J. Seibold, M.Eng. J.-S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar

Einleitung

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeit besteht darin, den Einfluss der Geometrie von Makroporen auf die resultierende Scherbenwärmeleitfähigkeit von Ziegelkeramik zu untersuchen. Dafür werden Laborziegel so porosiert, dass die mittleren Volumina der erzeugten Einzelporen für jedes Porosierungsmittel näherungsweise konstant bleiben sowie jeweils die Gesamtporenvolumina und die Rohdichten, während ausschließlich die Porengeometrie variiert wird. Dazu werden sphärische, quaderförmige und zylinderförmige Porengeometrien in der Ziegelkeramik erzeugt. Das Volumen jeder einzelnen Pore soll im Mittel $9 \text{ mm}^3 \pm 1 \text{ mm}^3$ betragen.

Ausgangsmaterialien

Für die Herstellung der Laborziegel wird ein bereits aufbereiteter Ton aus der Ziegelindustrie eingesetzt. Die Porosierung erfolgt mit ausbrennbaren organischen Polymerverbindungen. Zur Generierung der sphärischen Poren wird kommerzielles, expandiertes Polystyrol (EPS) in Kugelform mit einem mittleren Durchmesser von 4,5 mm eingesetzt. Für die Herstellung der quaderförmigen Poren wird eine Platte aus High Impact Polystyrol (HIPS) auf die Maße (L x B x H) 4,0 mm x 2,2 mm x 1,0 mm zurechtgeschnitten. Für die Darstellung der zylindrischen Poren wird Polymilchsäuregranulat (PLA) eingeschmolzen, zu einem PLA-Endlosfaden mit einem Durchmesser von 1,1 mm extrudiert und entsprechend auf eine mittlere Länge von 10,2 mm gestückelt.

Herstellung der Laborziegel

Der vorgewalzte Ziegelton (Walzenspalt 0,9 mm) wird in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend werden jeweils 8 kg getrockneter Ton mit 1,9 l Anmachwasser angemischt und in einem geschlossenen Behälter über einen Zeitraum von sieben Tagen gemaukt. Dieser Vorgang ist wichtig, um die für den Extrusionsprozess nötige Plastizität einzustellen. Die Homogenisierung und Formgebung durch Extrusion wird mit einem gegenläufigen Doppelschneckenextruder unter einem Teilvakuum von 0,8 bar durchgeführt. Dazu wird ein rechteckiges Mundstück ohne Lochanteil verwendet (Abbildung 1.5).



Abbildung 1.5: Extrusion plattenförmiger Tonproben zur Herstellung von Laborziegeln (l). Frisch extrudierte, pressfeuchte Ziegelrohlinge (r).

Vor der endgültigen formgebenden Extrusion werden den Tonmischungen 20 Vol.-% der genannten Porosierungsmittel jeweils in Monoporosierung hinzugefügt und die Mischungen homogenisiert. Im Anschluss werden die Ansätze aus Tonmischung mit Porosierungsmittel sowie die Nullprobe, die nur aus der Tonmischung besteht, wiederholt im Extruder homogenisiert, bis sich bei allen Proben eine Deformationszahl nach Pfefferkorn von $2,5 \pm 0,125$ eingestellt hat. Die eigentliche Formgebung erfolgt durch eine Mundstücksplatte mit rechteckigem Öffnungsprofil und ohne Lochanteil mit den Öffnungsmaßen (B x H) 120 mm x 35 mm. Die pressfeuchten Tonstränge verlassen das Mundstück und werden mittels Schneidedraht jeweils auf eine Länge von 150 mm gekürzt. Die Trocknung der Tonrohlinge erfolgt in einem sehr schonenden, mehrstufigen Verfahren. Dabei findet in einem ersten Schritt eine Trocknung bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 24 h statt. Anschließend werden die Rohlinge über weitere sechs Tage in einem Trockenschrank schrittweise (60 °C, 75 °C, 90 °C und 105 °C) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (Abbildung 1.6). Danach werden die Tonrohlinge in einem Laborofen gesintert, der durch elektrische Widerstandsheizung beheizt wird. Schwelgase, die im Temperaturfenster zwischen 200 bis 500 °C entstehen, werden durch eine thermische Nachverbrennung zu CO₂ und H₂O oxidiert. Im Sinterofen wird das Brenngut in zwei Stufen auf die Garbrandtemperatur von 950 °C erhitzt, die dann über einen Zeitraum von 2 h konstant gehalten wird (Abbildung 1.6). Nach einer Gesamtbrennzeit von insgesamt 11,5 h wird

die Beheizung des Ofens ausgeschaltet, so dass der Ofenraum einschließlich der Laborziegel ohne weitere Regelung abkühlt.



Abbildung 1.6: Temperatur-Zeit-Programm zur schonenden Trocknung der Tonrohlinge bis zur Gewichtskonstanz (l); Lagerung der Tonrohlinge im Trockenschrank (m) und verwendete Brennkurve für das Sintern der Laborziegel (r).

Nach dem Brennprozess werden die fertig gesinterten Laborziegel mit einer Kappsäge zugeschnitten. Die beiden gegenüberliegenden größeren Flächen werden mithilfe einer Oberflächenschleifmaschine auf ihre endgültigen Maße (L x B x H) 100 mm x 100 mm x 20 mm planparallel geschliffen (Abbildung 1.7). Die beiden Nachbehandlungsschritte (Sägen und Schleifen) erfolgen unter Wasserspülung, weshalb die fertig geschliffenen Laborziegel erneut im Trockenschrank bei 105 °C rückgetrocknet werden. Danach lagern die Laborziegel bis zur Messung der Rohdichten und der Scherbenwärmeleitfähigkeiten bei Raumtemperatur im Exsikkator.



Abbildung 1.7: Fertig gesinterte, porosierte Laborziegel mit sphärischen (l), quaderförmigen (m) und zylindrischen (r) Poren und zugehörige Porosierungsmittel (EPS, HIPS und PLA).

Ergebnisse

Bestimmung des Porenvolumens der eingesetzten Porosierungsmittel mit dem Lichtmikroskop

Zur Bestimmung des Porenvolumens der verwendeten Porosierungsmittel werden die relevanten Längenmaße an je 30 Proben mit dem Lichtmikroskop ausgemessen und die Ergebnisse gemittelt. Die Volumina der eingesetzten Porosierungsmittel betragen 48,602 mm³ bei den sphärischen EPS-Kugeln, 8,676 mm³ bei den HIPS-Quadern und 9,676 mm³ bei den PLA-Zylindern (Tabelle 1).

Tabelle 1: Mittelwerte der Abmessungen sowie die daraus resultierenden Volumina der unterschiedlichen Porosierungsmittel mit zugehörigen Standardabweichungen.

Form des Porosierungsmittels	Durchmesser [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Volumen [mm ³]	STABW d. Volumen [mm ³]
Sphärisch	4,476	-	-	-	48,602	16,128
Quaderförmig	-	3,964	2,191	1,000	8,676	0,984
Zylindrisch	1,100	10,182	-	-	9,676	0,286

Die EPS-Kügelchen zur Erzeugung sphärischer Poren besitzen mit 48,602 mm³ ein deutlich größeres Einzelvolumen als die beiden anderen Porosierungsmittel HIPS und PLA. Die vergleichsweise größeren Abmessungen werden so gewählt, da die EPS-Kügelchen beim Extrusionsvorgang komprimiert werden. Durch das verwendete Übermaß werden praktisch die gleichen Porengrößen und Porenvolumina in der Ziegelkeramik generiert, wie bei den Porosierungsmitteln HIPS und PLA (Tabelle 2).

Bestimmung der Volumina der erzeugten Poren mittels Lichtmikroskop

Für die Erfassung der nach dem Brand resultierenden Einzelporenvolumina in der Ziegelkeramik werden von jedem der drei Porentypen jeweils 100 Einzelmessungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt (Abbildung 1.8 und Tabelle 2).

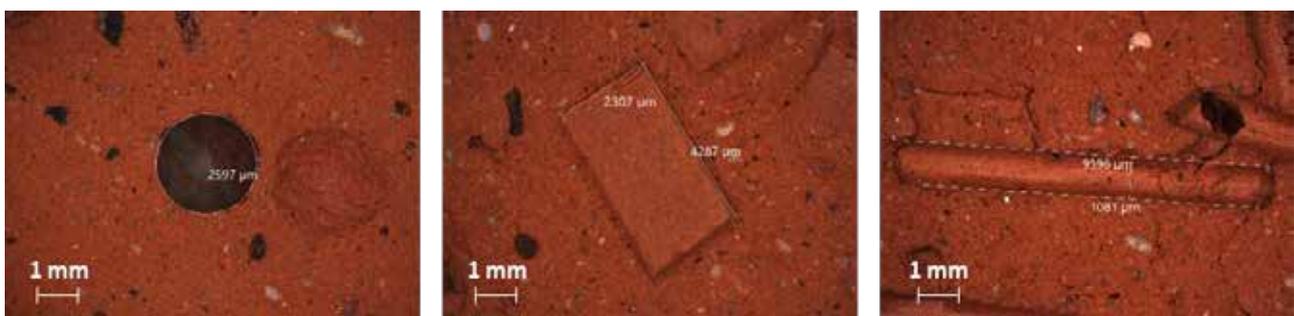


Abbildung 1.8: Lichtmikroskopische Aufnahmen jeweils einer sphärischen (l), einer quaderförmigen (m) und einer zylindrischen Pore (r) in Ziegelkeramik.

Das gemittelte Porenvolumen der sphärischen Einzelporen beträgt 9,198 mm³. Die mittleren Porenvolumina der quaderförmigen bzw. zylindrischen Einzelporen betragen 9,260 mm³ bzw. 9,157 mm³.

Tabelle 2: Mittelwerte der Einzelporenvolumina und zugehörige Standardabweichungen.

Porengeometrie	EPS	HIPS	PLA
	Sphärisch	Quaderförmig	Zylindrisch
Porenvolumen [mm ³]	9,198	9,260	9,157
Standardabweichung [mm ³]	7,771	2,358	0,890

Aus der lichtmikroskopischen Untersuchung geht hervor, dass sich das zylinderförmige Porosierungsmittel PLA beim Extrusionsvorgang weitestgehend longitudinal in Extrusionsrichtung ausrichtet, so dass nach dem Ausbrand eine Vorzugsorientierung der resultierenden Zylinderporen in der Ziegelkeramik vorliegt (Abbildung 1.9). Bei den quaderförmigen Poren ist dagegen keine eindeutige Vorzugsorientierung erkennbar.

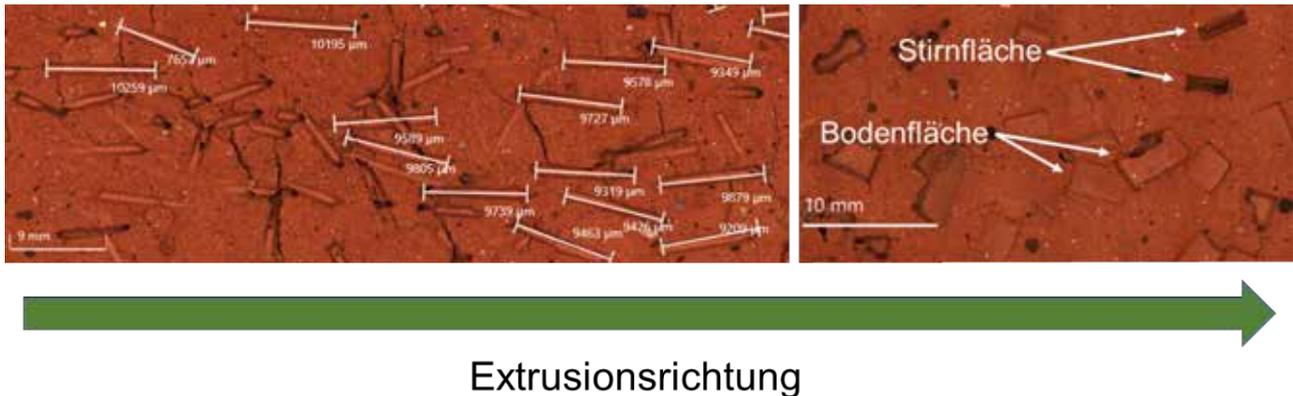


Abbildung 1.9: Vorzugsorientierung der zylindrischen Poren in Extrusionsrichtung (l); keine eindeutige Vorzugsorientierung der quaderförmigen Poren in Extrusionsrichtung (r).

Rohdichten und Scherbenwärmeleitfähigkeiten

Die unterschiedlich porosierten Laborziegel werden auf ihre Rohdichten und Scherbenwärmeleitfähigkeiten untersucht. Von jedem Probentyp werden fünf Messungen der Rohdichte durchgeführt und daraus die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet (Abbildung 1.10). Die unporosierte Nullprobe zeigt erwartungsgemäß mit $1,90 \text{ g/cm}^3$ die höchste Rohdichte. Bei allen Proben führt die Porosierung mit unterschiedlichen Porengeometrien zu niedrigeren Rohdichten. Die Probe mit sphärischen Poren hat eine Rohdichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$, die Proben mit quaderförmigen und zylindrischen Poren zeigen Rohdichten von $1,57 \text{ g/cm}^3$ und $1,56 \text{ g/cm}^3$. Die Absenkungen der Rohdichten im Vergleich mit der unporosierten Nullprobe liegen somit in einem Bereich zwischen 16,84 % und 17,89 %. Die Scherbenwärmeleitfähigkeiten der Laborziegel werden mit einem Wärmestromplattenmessgerät nach DIN EN ISO 12667 für homogene Feststoffproben ermittelt. Dazu werden die Wärmeleitfähigkeiten bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C , 25 °C und 35 °C ermittelt. Anschließend wird durch lineare Regression die Scherbenwärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C bestimmt und mit $\lambda_{10,\text{tr}}$ bezeichnet.



Abbildung 1.10: Mittelwerte und Standardabweichungen der Rohdichten von Laborziegeln mit quaderförmigen, sphärischen und zylindrischen Porengeometrien im Vergleich mit der unporosierten Ziegel-Nullprobe.

Je Porosierungstyp werden vier Laborziegel vermessen und daraus die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Rohdichten sowie Scherbenwärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ von Laborziegeln mit quaderförmigen, sphärischen und zylindrischen Porengeometrien im Vergleich mit der unporierten Ziegel-Nullprobe.

Laborziegel	Rohdichte		Scherbenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$	
	Mittelwert [g/cm ³]	STABW [g/cm ³]	Mittelwert [W/(mK)]	STABW [W/(mK)]
Nullprobe (ohne Poren)	1,90	0,03	0,365	0,005
Quaderförmige Poren	1,58	0,01	0,301	0,006
Sphärische Poren	1,57	0,01	0,297	0,001
Zylindrische Poren	1,56	0,02	0,267	0,004

STABW = Standardabweichung

Die Ziegelnullprobe ohne Porosierungsmittelzugabe zeigt mit 0,365 W/(mK) die höchste Scherbenwärmeleitfähigkeit. Bei allen porierten Laborziegeln werden vergleichsweise niedrigere Scherbenwärmeleitfähigkeiten und damit eine verbesserte Wärmedämmung erzielt. Durch die Einbringung quaderförmiger Poren wird die Scherbenwärmeleitfähigkeit auf 0,301 W/(mK) und somit um 17,66 % gesenkt. Die sphärischen Poren bewirken eine Senkung der Scherbenwärmeleitfähigkeit auf 0,297 W/(mK), entsprechend um 18,69 %, während die zylindrischen Poren die stärkste Minderung auf 0,267 W/(mK) verursachen, was einer Absenkung um 26,97 % entspricht (Abbildung 1.11).

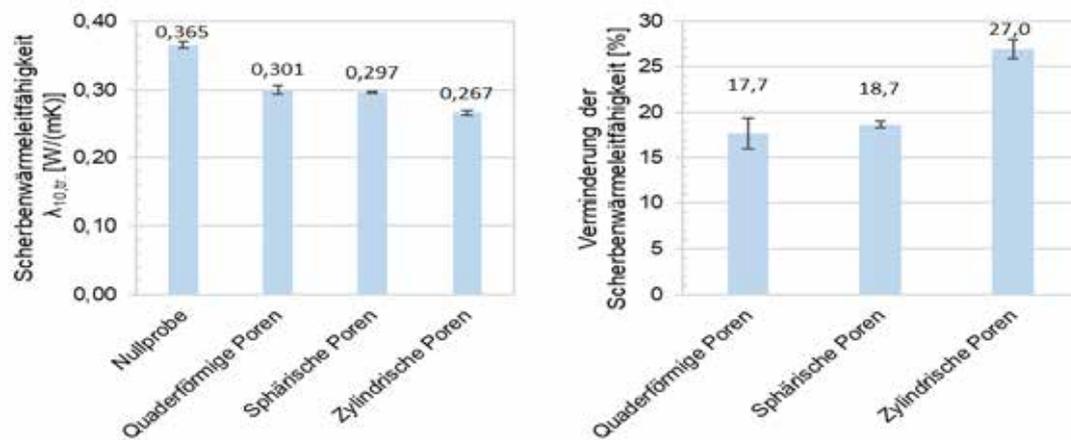


Abbildung 1.11: Mittelwerte und eingezeichnete Standardabweichungen der Scherbenwärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ von Laborziegeln mit quaderförmigen, sphärischen und zylindrischen Porengeometrien im Vergleich mit der unporierten Ziegel-Nullprobe (l) und die daraus resultierenden prozentualen Absenkungen der Scherbenwärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ (r).

Aus der Untersuchung geht hervor, dass die Scherbenwärmeleitfähigkeiten durch die drei unterschiedlichen Porengeometrien unterschiedlich stark vermindert werden. Bei Ziegelproben mit quaderförmigen Poren wird die Scherbenwärmeleitfähigkeit um 17,7 % gesenkt, während die Einbringung sphärischer Poren zu einer Absenkung um 18,7 % führt. Die stärkste Minderung der Scherbenwärmeleitfähigkeit um 27,0 % wird durch die Zylinderporen bewirkt. Während der Extrusion orientieren sich die zylinderförmigen PLA-Teilchen weitestgehend longitudinal in Fließrichtung des Ziegeltons. Nach dem Ausbrand weisen die entstandenen zylinderförmigen Makroporen eine Vorzugsorientierung in Extrusionsrichtung auf, so dass eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit resultiert. Wird ein Wärmestrom senkrecht zur Ausrichtung der zylinderförmigen Poren durch den Ziegelscherben geleitet, so zeigt sich ein vergleichsweise höherer Wärmewiderstand als bei den beiden anderen Porengeometrien.

Die quaderförmigen Poren liegen in zufällig wirkender, ungeordneter Orientierung im Ziegelscherben vor. Eine Vorzugsorientierung der Porenausrichtung ist nicht erkennbar. Diese Aussage wird dadurch gestützt, dass die quaderförmigen Poren eine Reduktion der Scherbenwärmeleitfähigkeit in einem ähnlichen Ausmaß bewirken (17,7 %) wie die sphärischen Poren (18,7 %), bei denen geometrisch keine Vorzugsorientierung möglich ist. Alle drei hier eingesetzten Porosierungsmittel führen erwartungsgemäß zu einer Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeit von Ziegelkeramik und damit zu verbesserten Wärmedämmeigenschaften. Im Falle der Porosierung mit einem zylinderförmigen Porosierungsmittel kommt es zu einer longitudinalen Vorzugsorientierung der Zylinderporen und

dadurch zu einer vergleichsweise stärkeren Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeit, wenn der Wärmestrom senkrecht zur Porenausrichtung durch den Ziegel verläuft.

1.1.3 Ziegel 2020 – Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Werkstofftechnik, M.Eng. D. Sappa, M.Eng. R. Karsdorf und Prof. Dr. W. Krcmar

Einleitung

Ziel des Forschungsvorhabens (PTJ-FKZ 03ET1526A) ist die Verbesserung thermischer und akustischer Ziegeleigenschaften bei gleichzeitiger Verkürzung der Entwicklungszeiten für neue und verbesserte Hochlochziegel-Geometrien. Dafür wird eine Kombination PC-gestützter Verfahren, nämlich CAD, Simulationen mittels Finiter Elemente Methoden (FEM) und 3D-Druck durchgeführt. Im computergestützten Design (CAD) werden bestehende Ziegel-Geometrien nachkonstruiert und neue Entwürfe kreiert. Dabei werden neue Ideen zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften, der Druckfestigkeiten und der Schalldämmung in die künftige Geometrie der Hochlochziegel integriert. Mittels der FEM-Simulationen werden die jeweiligen Veränderungen auf ihre Wirksamkeit geprüft und mit den Werten des Originalziegels verglichen. So optimierte Hochlochziegel können sofort durch ein 3D-Prototyping aus Polymilchsäure hergestellt werden. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die aus Kunststoff hergestellten Ersatzziegel im Rahmen einer Einzelsteinmessung im Wärmeprüfstand im Vergleich mit dem ebenfalls aus PLA hergestellten Originalziegel vermessen werden können. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen thermischen Wärmeleitfähigkeiten von PLA und Ziegelkeramik gelingt die Vorhersage der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit neuentwickelter Hochlochziegel mit optimierten Eigenschaften, ohne dass ein keramischer Ziegel hergestellt werden muss. Durch dieses innovative Vorgehen kann der bisher übliche langwierige Entwicklungsprozess für hochwärmedämmende Ziegel, aber auch für neue Ziegelprodukte mit anderen optimierten Werkstoffeigenschaften drastisch verkürzt und neue Produkte können schneller als bisher auf den Markt gebracht werden.

Schallstopper-Technologie

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Entwicklung der sogenannten „Schallstopper-Technologie“. Dabei werden die keramischen Stege in der Ziegelgeometrie in geeigneter Weise variiert (Abbildung 1.12). Die Formgebung so modifizierter Ziegel erfolgt durch eine entsprechende Anpassung des Formgebungswerkzeugs am Ziegelextruder.

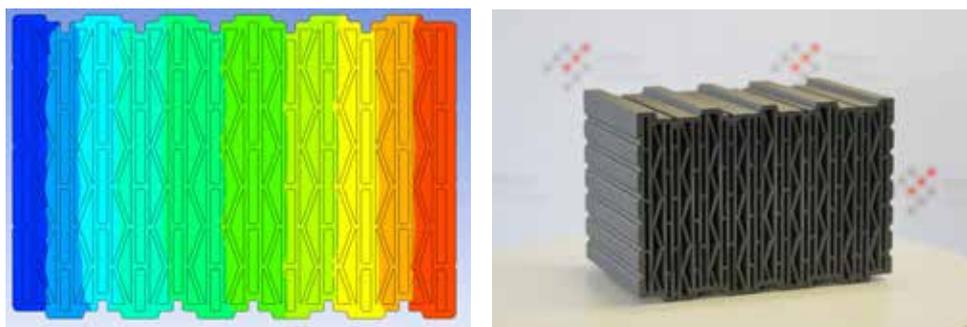


Abbildung 1.12: Simulation der Temperaturverteilung (blau: 5 °C bis rot: 15 °C) innerhalb eines kommerziell erhältlichen Ziegels (Links). 3 D-Druck eines „Ersatzziegels“ aus Polymilchsäure (PLA) vor der Schallschutz-Optimierung (Rechts).

Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die „Schallstopper-Technologie“ das bewertete Schalldämm-Maß nach DIN EN ISO 717-1 erhöhen kann, so dass sich damit ausgerüstete Ziegel durch vergleichsweise verbesserte Schallschutzeigenschaften auszeichnen.

In Abbildung 1.14 werden in einem Ziegelsegment die Auswirkungen der applizierten „Schallstopper“ auf das bewertete Schalldämm-Maß nach DIN EN ISO 717-1 verdeutlicht. Die graphische Darstellung zeigt das frequenzabhängige Schalldämm-Maß, wobei einzelne Frequenzen unterschiedlich stark gedämmt werden. Das Ziel der DIN-Norm besteht darin, den Graphen in einen aussagekräftigen Wert zu überführen, das sogenannte bewertete Schalldämm-Maß. Die in

blau dargestellte Kurve dient als Referenz. Zur Angabe des bewerteten Schalldämm-Maß ist ausschließlich der Bereich relevant, in dem die gemessenen bzw. simulierten Werte die Referenzkurve unterschreiten. Hierbei gilt als Faustregel: je geringer die Fläche, desto besser die Schalldämmung.



Abbildung 1.13: Detail-Ausschnitt aus der Geometrie eines 3 D-gedruckten „Ersatzziegels“ aus Polymilchsäure (PLA) vor der Schallschutz-Optimierung.

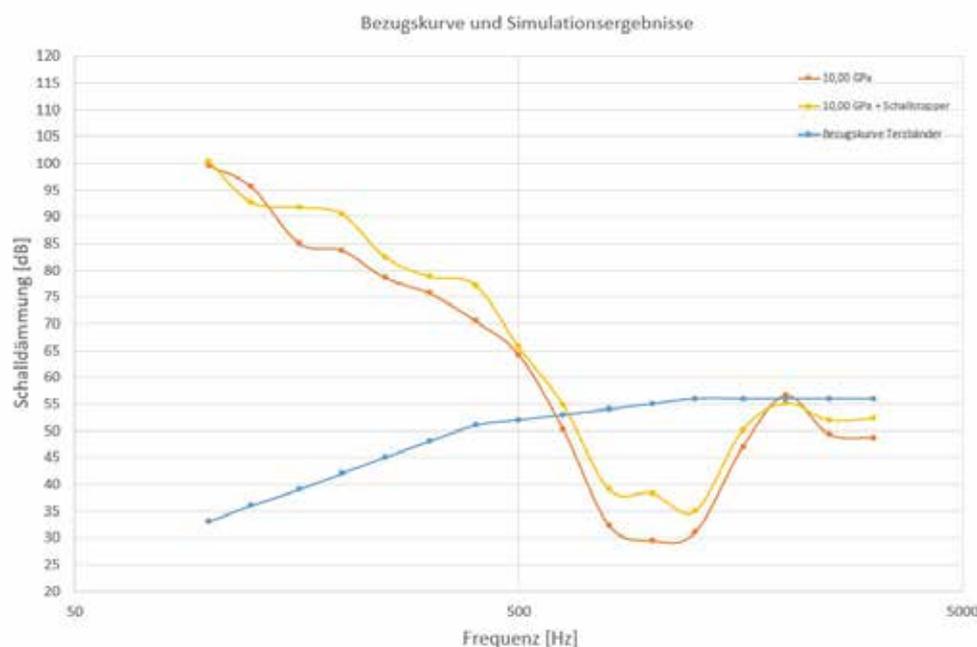


Abbildung 1.14: Frequenzabhängiges Schalldämm-Maß eines Ziegelsegments ohne (Orange) und mit „Schallstoppnern“ (Gelb) bei einem ziegeltypischen Elastizitätsmodul von je 10 GPa.

Mit der zusätzlichen Durchführung wärmetechnischer FEM-Berechnungen wurde festgestellt, dass sich trotz der schalltechnischen Eingriffe am Lochbild eines Ziegels, dessen äquivalente Wärmeleitfähigkeit praktisch nicht verändert, aber das Schalldämm-Maß vergleichsweise und je nach Höhe des E-Moduls des keramischen Ziegelscherbens, um 1 dB bis 5 dB angehoben wird. Dies entspricht einer Verbesserung der Schalldämmung um mindestens 126 % bis maximal möglichen 316 %. Durch die Massezunahme des Ziegels um ca. 10 % infolge der zusätzlichen „Schallstopper“ kann davon ausgegangen werden, dass die Druckfestigkeit eines Mauerziegels nicht nur erhalten, sondern sogar erhöht wird.

Die mittels PC-gestützter Verfahren optimierten bzw. neuentwickelten Ziegel-Prototypen werden mittels Rapid Prototyping-Verfahren mit einem 3D-Drucker aus Polymilchsäure hergestellt (Abbildung 1.15) und anschließend im Wärmeprüfstand (Halbsteinverfahren mit Einzelstein-Messung) auf ihre äquivalente Wärmeleitfähigkeit vermessen.



Abbildung 1.15: 3D-Drucker „BigRep One v3“ (l); 3D-Druck eines „Ersatzziegels“ aus Polymilchsäure (r). Der PLA-Ersatz-Ziegel kann im Wärmeprüfstand auf seine äquivalente Wärmeleitfähigkeit vermessen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die neuentwickelte „Schallstopper-Technologie“ bewirkt eine Erhöhung des bewerteten Schalldämm-Maß in einem Ziegelsegment. Diese Erhöhung ist abhängig vom E-Modul und den Stegdicken und findet in jedem Fall statt. Schwingungsfähigere Systeme profitieren von der Schallstopper-Technologie am stärksten.

Die Betrachtung einzelner Segmente des Ziegelaufbaus weist viele Vorteile auf, jedoch können noch weitere Effekte des ganzen Ziegels, allen voran die geschlossene Außenkontur, eine größere Rolle spielen. Den gesamten Ziegel betrachtend, führt die „Schallstopper-Technologie“ zu keiner Zunahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten, wie aus den durchgeführten Simulationen und Messungen an keramischen und PLA-Ziegelprototypen bekannt ist. Die „Schallstopper-Technologie“ kann auf jede Geometrie eines Hochlochziegels angewendet werden. Da es sich um ein laufendes Forschungsvorhaben handelt, muss derzeit die Ausbildung, Anordnung und Fertigung der "Schallstopper" geheim gehalten werden.

1.1.4 EU-Projekt Horizon 2020 „LightCocoe: Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Werkstofftechnik, M.Eng. C. Allar, M.Eng. K. Oeder und Prof. Dr. W. Krcmar



Das EU-Projekt „LightCocoe“ (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, wobei alle verfahrenstechnischen Schritte der Ziegelherstellung von der Rohstoffmischung, Aufbereitung, Formgebung, Trocknung und dem Brennprozess abgebildet werden. Darüber hinaus können die wesentlichen werkstofftechnischen Ziegeleigenschaften geprüft werden sowie analytische Untersuchungen an den Produkten erfolgen. Im Berichtszeitraum wurden ein Ziegelextruder, ein Trockenschrank und ein Brennofen mit speziellen Sensoren zur online-Messung verfahrenstechnischer Parameter ausgestattet:

- Ziegel-Extruder: Druck- und Temperatur
- Trockenschrank: Relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Brennofen: Temperatur

Außerdem wurde ein tragbares Mess-System zur Bestimmung der Parameter Temperatur, CO-, CO₂- und O₂-Gehalt im Ofenabgas angeschafft. Mit der so installierten Sensor-Ausrüstung besteht jetzt die Möglichkeit im Verlauf von Versuchsproduktionen die oben genannten verfahrenstechnischen Kenngrößen online zu erfassen und in Versuchsprotokollen zu dokumentieren. Dadurch können neue Forschungsergebnisse schneller in die Großproduktion eines Ziegelwerks übertragen werden. Die Arbeitsgruppe führt bereits erste Versuche mit der Pilotanlage durch.

Im Rahmen einer Aufgabenstellung sollen die Scherbenrohddichte, die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ bzw. die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Ziegelkeramik gegenüber dem Stand der Technik abgesenkt werden. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die Druckfestigkeit nicht verringert werden soll. Kommerziell erhältliche hochwärmedämmende Ziegel gemäß dem Stand der Technik verfügen in etwa über die nachfolgend angegebenen Kenngrößen (Tabelle 4). Das Ziel besteht darin, die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ um etwa 33,3 % und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit um etwa 28,6 % abzusenken.

Tabelle 4: Stand der Technik und Zielgrößen bei der Entwicklung hochwärmedämmender Leichthochlochziegel.

Parameter	Stand der Technik	Zielgrößen
Scherbenrohddichte ρ [kg/dm ³]	1,5	$\leq 1,0$
Druckfestigkeit σ [N/mm ²]	≥ 6	≥ 6
Thermische Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ [W/(mK)]	0,375	0,25
Äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,07	0,05

Das Ziel soll u.a. durch Integration von Nanoporen in die Ziegelkeramik erreicht werden. Im hier gezeigten Beispiel wird „Carbon Black“ (Ruß) als ausbrennbares Nano-Porosierungsmittel verwendet (Abbildung 1.16).



Abbildung 1.16: Erprobung von Carbon Black (Ruß) als ausbrennbares Nano-Porosierungsmittel (Links); Einarbeitung von Carbon Black in Ziegelton mittels Eirich-Mischer (Mitte links); Extrusion von Ziegelton mit Carbon Black (Mitte rechts); extrudierte Tonplatten mit Carbon Black im Trockenschrank (r).

Die nachfolgende Abbildung 1.17 zeigt die bisher erreichte Absenkung der Scherbenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ um 22,7 % bei Dosierung von 5 Ma.-% „Carbon Black“ (Ruß) als Nano-Porosierungsmittel zu einem Mauerziegelton. Es kann angenommen werden, dass bei Dosierung von maximal 8 Ma.-% „Carbon Black“ die gewünschte thermische Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ von 0,25 W/(mK) erreicht werden kann. Bei Dosierung von 5 Ma.-% „Carbon Black“ wird die Druckfestigkeit von 107,6 MPa um 11,8 % auf 94,9 MPa abgesenkt. An diesen Versuchen wird derzeit gearbeitet.

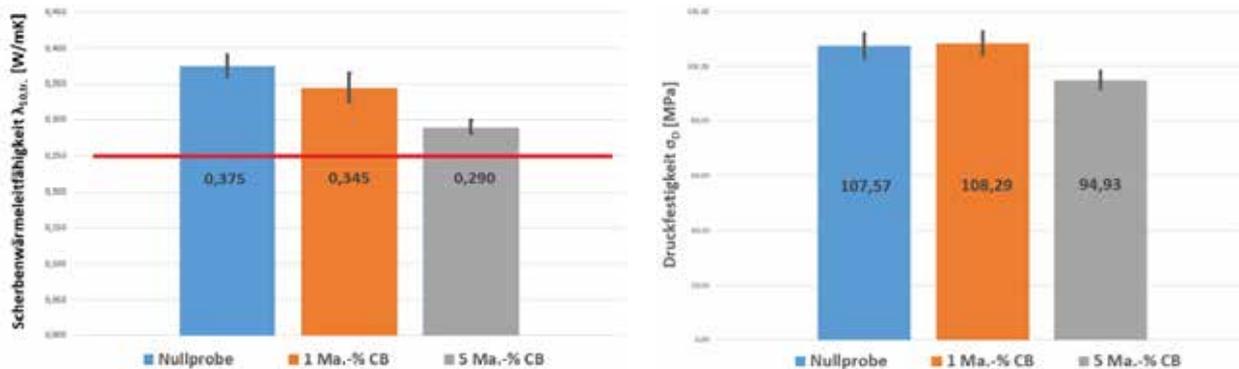


Abbildung 1.17: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ (l) und Druckfestigkeiten (r) von Laborziegeln in Abhängigkeit von der Zugabe an „Carbon Black“ als Porosierungsmittel im Vergleich mit der unporierten Ziegel-Nullprobe. Es kann angenommen werden, dass die Zielgröße $\lambda_{10, tr} = 0,25$ W/(mK) durch Porosierung mit etwa 8 Ma.-% „Carbon Black“ erreicht werden kann (rote Linie).

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



Einleitung

Im Jahr 2019 wurden allein in Deutschland 222.678 neue Bauvorhaben genehmigt. Für die Erstellung von Neubauten in dieser Größenordnung werden den Anforderungen entsprechend geeignete Baustoffe eingesetzt wie beispielsweise Beton, Porenbeton, Kalksandstein oder Ziegelsteine. Allen Baustoffen ist gemein, dass für ihre Herstellung bedeutende Rohstoff- und Energie-Ressourcen aufgewendet werden müssen. Dabei findet durch die thermische Behandlung eine CO_2 -Abspaltung aus mineralischen Einsatzstoffen statt, mit entsprechenden CO_2 -Emissionen. Gleichzeitig führt die Verbrennung der benötigten Primärbrennstoffe ebenfalls zu einer CO_2 -Freisetzung. Um die Klimaschutzziele zu erreichen sollten sich Baustoffe der Zukunft bereits bei ihrer Herstellung durch einen geringeren Energieverbrauch mit verminderten CO_2 -Emissionen auszeichnen. Künftige Baustoffe sollten aber zusätzlich das Kriterium erfüllen, aus einem geeigneten Anteil an Recyclingmaterial zu bestehen. Allein in Deutschland sind im Jahr 2018 über 228 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle angefallen. Deshalb beschäftigt sich das hier vorgestellte EU-Projekt (LIFE18 CCM/ES/001114) mit einer neuen Baustoffklasse, den sogenannten Geopolymeren, für deren Herstellung feingemahlener Bauschutt verwertet werden kann. Geopolymere sind kalterhärtende Bindebaustoffe die bei Ihrer Herstellung einen vergleichsweise bedeutend geringeren Primärenergieverbrauch benötigen mit entsprechend niedrigeren CO_2 -Emissionen. Im Vorhaben werden verschiedene Abbruchmaterialien aus dem Baubereich wie gemahlener Ziegelbruch, Ziegelschleifstaub, Mischbauschutt und Betonbauschutt bezüglich ihrer Eignung als Recycling-Rohstoffe zur Herstellung von Geopolymer-Baustoffen untersucht. Zusätzlich wurde eine Klasse F-Flugasche aus einem Steinkohlekraftwerk mit der Bezeichnung Microsit 10 verwendet.

Durchgeführte Arbeiten

Alle hier verwendeten Reststoffe wurden mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse (XRF) auf ihre chemische Zusammensetzung und mittels Röntgenbeugung (XRD) auf ihre mineralogische Zusammensetzung untersucht. Daraus resultiert, dass sich alle fünf Reststoffe zur Herstellung von Geopolymer-Steinen eignen könnten. Im Rahmen der Arbeiten erfolgt die Herstellung von Geopolymer-Steinen mit einer alkalischen Aktivierungslösung und jeweils 100 Gew.-% der aufbereiteten, sortenreinen Reststoff-Zuschläge. Die Versuchsansätze werden in einem Labormischer über einen Zeitraum von jeweils 15 min mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 250 U/min homogenisiert. Dabei entsteht eine homogene Paste, die unmittelbar in Formen aus Silikon oder Stahl eingefüllt wird (Abbildung 1.18).

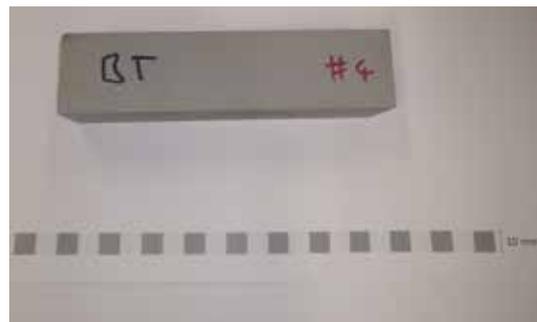


Abbildung 1.18: Befüllung von Prismen-Formen mit Geopolymer-Paste (l). Entformtes, ausgehärtetes Geopolymer-Prisma z.B. für die Bestimmung der Dreipunkt-Biegezugfestigkeit (r).

Um die dabei eingebrachten Luftblasen auszutreiben, wird jede befüllte Prismen-Form über einen Zeitraum von 5 min auf eine Vibrationsplatte gestellt. Für die Aushärtung werden die Bindebaustoff-Proben bei definierten Bedingungen, nämlich über einen Zeitraum von stets 48 Stunden und einer Temperatur von 85 °C im Trockenschrank gelagert. Nach diesem Aushärtungsprozess werden die Geopolymer-Prüflinge entformt. Für die Bestimmung der Druckfestigkeiten werden Würfel zugesägt und alle Flächen planparallel geschliffen, so dass Kantenlängen von stets (L x B x H) 40 mm x 40 mm x 40 mm entstehen. Für die Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeiten werden planparallel geschliffene Probepplatten mit den Maßen (L x B x H) 100 mm x 100 mm x 25 mm hergestellt. An diesen Probepplatten wird außerdem eine Rohdichte-Bestimmung durchgeführt, unter Verwendung der jeweiligen Massen und der äußeren Proben-Abmessungen. Alle Geopolymer-Proben die beim Sägen und Schleifen mit Wasser in Kontakt kommen, werden vor der Messung werkstofftechnischer Kenngrößen im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und danach bis zur Messung im Exsikkator gelagert.

Ergebnisse

In Abbildung 1.19 werden die mittleren Druckfestigkeiten der verschiedenen Geopolymer-Sorten vergleichend gegenübergestellt. Daraus geht hervor, dass die mit reiner Flugasche (100 Gew.-%) hergestellten Geopolymere mit 96,6 MPa die höchsten Druckfestigkeiten erreichen. Die schlechtesten Druckfestigkeiten mit 14,9 MPa zeigen die mit reinem Ziegelschleifstaub (100 Gew.-%) hergestellten Geopolymere. Wird der Ziegelschleifstaub gegen gemahlene Ziegelbruch (100 Gew.-%) ausgetauscht, so resultieren Geopolymer-Druckfestigkeiten von 32,31 MPa. Die mit reinem Mischbauschutt (100 Gew.-%) und reinem Betonbauschutt (100 Gew.-%) hergestellten Geopolymere weisen Druckfestigkeiten von 18,7 MPa und 19,3 MPa auf. In Abbildung 1.19 sind auch die korrelierenden Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Geopolymer-Steine aus Ziegelschleifstaub und aus fein gemahlendem Ziegelbruch mit 0,28 W/(mK) und mit 0,31 W/(mK) die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Die Geopolymer-Steine aus Flugasche und aus Betonbauschutt haben jeweils mit 0,32 W/(mK) nur geringfügig höhere Wärmeleitfähigkeiten. Die Geopolymer-Sorte aus Mischbauschutt verfügt mit $\lambda_{10, tr} = 0,47$ W/(mK) über vergleichsweise hohe Werte.

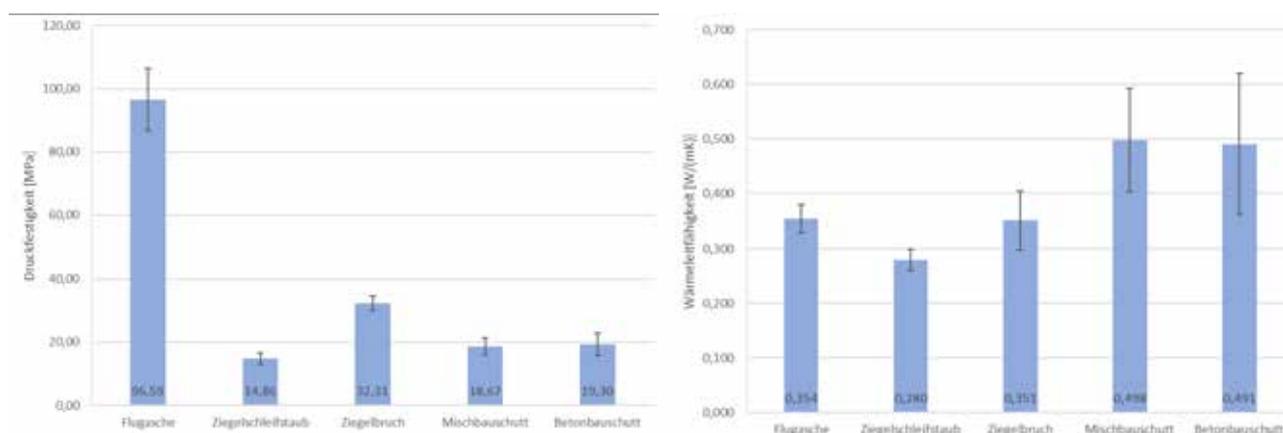


Abbildung 1.19: Mittelwerte der Druckfestigkeiten (l) und Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ (r) von Geopolymer-Steinen in Abhängigkeit vom Zuschlagstoff (Flugasche, Ziegelschleifstaub, Ziegelbruch, Mischbauschutt und Betonbauschutt).

Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist aus sortenrein aufbereiteten Baureststoffen neue Baustoffe auf Basis von Geopolymer-Werkstoffen zu generieren. Aufgrund unterschiedlicher Vorbehandlungen und verschiedener chemischer Zusammensetzungen der untersuchten Reststoffe differieren die werkstofftechnischen Ergebnisse der Geopolymer-Steine entsprechend stark. So gelingt beim Einsatz von Flugasche die Herstellung hochfester Geopolymere. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass die Flugaschen je nach ihrer Herkunft über vergleichsweise mehr aktivierte Silikat- und Aluminat-Gruppen verfügen, die durch die verwendete Aktivierungslösung leicht aufgeschlossen und dann als Reaktionspartner für die Geopolymerisation zur Verfügung stehen. Bezüglich der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ weisen die Geopolymer-Steine aus Ziegelschleifstaub und Ziegelbruch niedrigere und damit in Bezug auf die Wärmedämmeigenschaften bessere Werte auf, als das Flugasche-Geopolymer und die Mischbauschutt- und Betonbauschutt-Geopolymere. Dieser Effekt kann auf die höhere Mikroporosität der Ziegelwerkstoffe zurückgeführt werden. Insgesamt gelingt die Herstellung intakter Geopolymer-Steine aus allen hier eingesetzten sortenreinen mineralischen Baureststoffen. Dies trifft sogar auf die Reststoffe Misch- und Betonbauschutt zu, die möglicherweise weniger optimal zugängliche Silikat- und Aluminat-Gruppen aufweisen. Aufgrund der vorliegenden Untersuchung sind die werkstofftechnischen Eckparameter von Geopolymer-Steinen aus sortenreinen Reststoffen bekannt. In weiterführenden Arbeiten werden Mischungen dieser Reststoffe hergestellt, mit dem Ziel, die neuartigen Geopolymer-Steine mit maßgeschneiderten Werkstoffeigenschaften auszurüsten. Auch die Porosierung mit organischen und anorganischen Porosierungsmitteln zur Herstellung hochwärmedämmender Geopolymere bzw. Geopolymer-Schäume ist eine weitere Option. Durch das vorgestellte stoffliche Recycling aufbereiteter Baureststoffe zu neuartigen Baustoffen besteht die Möglichkeit bisher offene Wertstoffkreisläufe zu schließen sowie Rohstoff-Ressourcen und wertvolles Deponievolumen einzusparen. Es kann angenommen werden, dass am Ende ihrer Nutzungsphase verbrauchte Geopolymer-Baustoffe nach Zerkleinerung und Mahlung für die Herstellung neuer Geopolymer-Baustoffe recycelt werden können.

1.1.6 Versuchsbetrieb eines gasbefeierten Wirbelschicht-Sinterofens für keramische Elektronikbauteile kleinster Abmessungen“; *Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Werkstofftechnik; B.Eng. D. Roth, A. Kulik und Prof. Dr. W. Krcmar*

Das hier vorgestellte Forschungsprojekt gehört thematisch in den Schwerpunkt „Energieeffiziente Industrie“. Weil das Vorhaben aber in der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ bearbeitet wird, erfolgt der Einfachheit halber die Vorstellung des Projektes an dieser Stelle. Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines neuartigen Sinter-Verfahrens für kleinteilige elektrokeramische Bauteile. Derzeit werden keramische Mikrobauteile kleinster Abmessungen, z.B. Spulenkörper aus Steatit, im Tunnelofen bei höchsten Temperaturen gesintert. Dabei sintern die Mikrobauteile, infolge ihrer sehr kleinen Probenabmessungen von nur 1,6 mm x 0,8 mm x 0,8 mm auf den Brennhilfsmitteln fest und werden dabei beschädigt. Qualitätsmängel bis hin zur Zerstörung der Mikrobauteile sind die Folge. Aus diesem Grund soll der Tunnelofen-Brennprozess durch einen Sinterprozess im Schwebestand ersetzt werden. Mit dem neuen Wirbelschicht-Reaktor sollen Produkte mit verbesserter Qualität sowie optimierten elektrischen und mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Reduzierung des Primärenergie-Einsatzes hergestellt werden. Um dies zu erreichen, werden die Bauteile kleinster Abmessungen im vertikalen Abgasstrom einer Erdgasflamme in einen Schwebestand versetzt und dabei gesintert. Derzeit wird die Anlage für höchste Temperaturen von über 1150 °C ausgelegt. Im Berichtsjahr wurde der Wirbelschicht-Reaktor in einen betriebssicheren Zustand versetzt sowie an einen Abgaskamin und an eine Erdgasversorgung angeschlossen. Inzwischen wurden bereits eine ganze Reihe von Brennversuchen, bisher noch ohne Wirbelgut, erfolgreich durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Arbeiten werden die Temperaturprofile in axialer und radialer Richtung im Brennkanal messtechnisch ermittelt. Wenn die Versuche erfolgreich verlaufen, beginnen die Brennversuche mit Wirbelgut. Nachfolgend sind die zu sinternenden keramischen Mikrobauteile gezeigt sowie eine Prinzipskizze und ein Bild des Wirbelsinter-Versuchsofens. Das Vorhaben wird freundlicherweise von der STAEDTLER-Stiftung in Nürnberg gefördert.

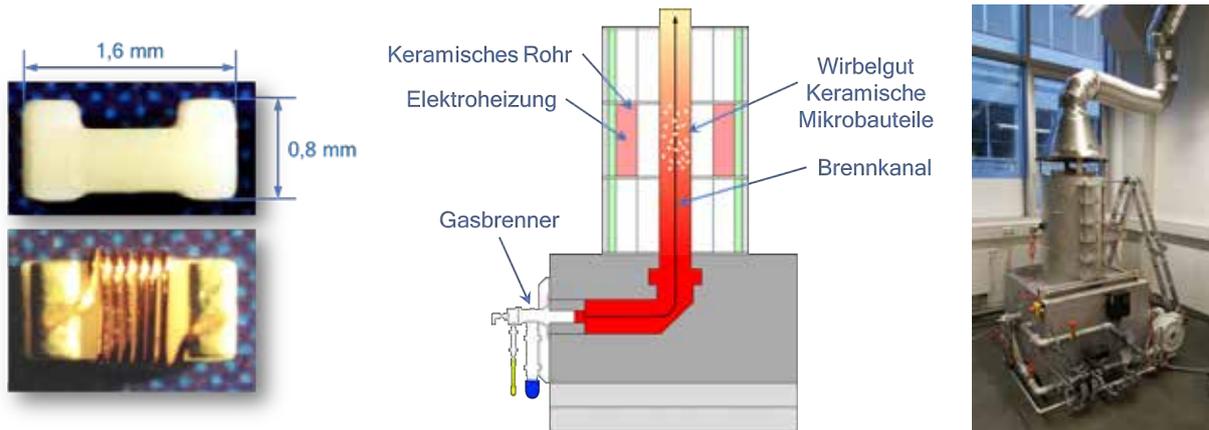


Abbildung 1.20: Kleinteilige Spulenkörper aus Elektrokeramik die bei höchsten Temperaturen gesintert werden müssen, ohne (links oben) und mit Spulenwicklung (links unten). Prinzipskizze des Wirbelsinter-Ofens mit angedeutetem Wirbelgut (mitte). Realisierter Wirbelsinter-Versuchsofen für das Brennen keramischer Mikrobauteile kleinster Abmessungen (rechts).

1.1.7 Patente

Im Berichtszeitraum wurde eine beim Patentamt eingereichte deutsche und eine europäische Patentanmeldung mit dem Titel „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“ (DE 10 2017 128 150 A1 und WO 2019/105877 A1) weiterbearbeitet. In beiden Patenten geht es um den Schutz eines Effektes, der im Rahmen von Forschungsarbeiten im EnCN entdeckt und aufgeklärt wurde. Die Dosierung eines geeigneten Zuschlagstoffs zu einem Dünnbett- oder Putzmörtel führt zu einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit und damit zu einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um immerhin 29 %. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass sich die Druckfestigkeit der Mörtel-Produkte nicht verschlechtert. Der hier geschützte Effekt kann auf alle portlandzementhaltigen Bindebaustoffe übertragen werden.

1.2 Teilautarke adaptive Technikfassade

1.2.1 Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Prof. Dr. Gunnar Grün

Die Mehrzahl der Gebäude in Deutschland, aber auch in Europa, befindet sich mittlerweile in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Im Rahmen der anstehenden Sanierungsmaßnahmen bietet die Aktivierung der Gebäudehülle mit Photovoltaik (PV) in Kombination mit Wärmedämmung die Chance, eine lokale Stromerzeugung in solchen Gebäuden zu erschließen. Häufig verhindern vermeintlich hohe Investitionskosten und Unsicherheiten im Planungsprozess (Brandschutz, Baurecht, Bauphysik, Statik) den Einsatz von PV-Fassaden, weshalb hier für die Technikfassade PV-Module als primäre energieadaptive Komponente für die Integration gewählt werden. Ziel ist es die PV-Elemente so in ein Fassadensystem zu integrieren, dass sie industriell gebrauchsfertig und hochpräzise produziert und schließlich an der Fassade eingehängt werden können. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde in den vorhergehenden Berichtszeiträumen eine solche Fassadenkonstruktion entwickelt und mittels bauphysikalischer Berechnungen ausgelegt bzw. bewertet. Basierend darauf wurde ein Mock-up aufgebaut (siehe Abbildung 1.21), um die Prinzipien der Konstruktion und die Funktionsweise der integrierten Fassade zu zeigen.



Abbildung 1.21: Mock-up der entwickelten modularen Technikfassade mit integrierten Photovoltaik-Modulen.

Anschließend wurde eine prototypische Testfassade entworfen und in Kleinserie im Rahmen eines Eigenforschungsprojektes des Fraunhofer IBP gefertigt. Als Anwendungsfall wurde ein Fassadenabschnitt eines Versuchsgebäudes auf dem Freigelände des Fraunhofer IBP gewählt. Die Bestandsfassade besteht aus verschiedenen Mauerwerks- bzw. Betonabschnitten und hat einen Attika-Abschluss zu einem Flachdach. Die Testfassade wird mittels Konsolenankern mit dem Bestand verbunden. Diese Konsolen gleichen auch die Maßtoleranzen des Bestandsbaus aus, so dass die Modulfassade unabhängig von den Rohbaumaßen gefertigt und montiert werden kann. In die Konsolen werden Montageeinheiten der Unterkonstruktion, bestehend aus zwei horizontalen Ringstücken und zwei vertikalen Lisenenstücken, eingehängt. Die eingehängten Montageeinheiten bilden sodann ein Gitter mit sämtlichen Einhängepunkten für die Fassadentafeln. Die Fassadentafeln sind unterschiedlich bestückt: u.a. mit PV-Modulen, Aluminiumplatten, Faserzementplatten, Isolierglas, Einscheibensicherheitsglas. Die Fassade kann als Warm- und Kaltfassade ausgebildet werden und erlaubt die erforderliche Hinterlüftung der PV-Elemente. Mittels Ausführung der Konsolanker in verschiedenen Tiefen kann die Fassade auch in der räumlichen Tiefe gestaltet werden (siehe auch Abbildung 1.22), hierbei entstehen verwölbte Flächen die durch die verwendeten Tafeln (Ausnahme: Standard-Isolierglas) aufgenommen werden können.

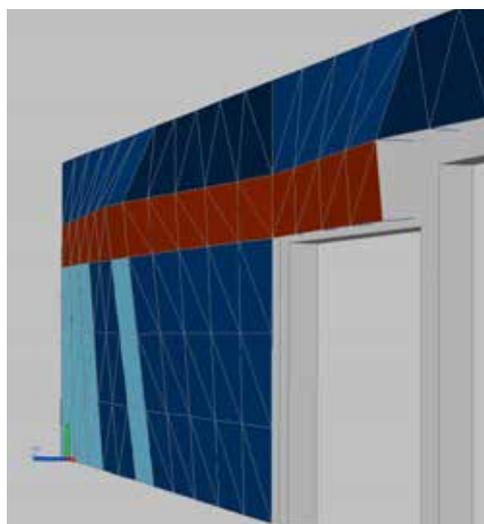


Abbildung 1.22: Perspektivische Darstellung eines Fassadenabschnitts. Die eingezeichneten Diagonalen dienen der Darstellung der verwölbten Flächen, die Farben stellen die unterschiedlichen Materialien dar (dunkelblau: PV-Module, blau: Aluminium, hellblau: Glas, weinrot: Faserzement).

Die modulare Technikfassade wurde basierend auf diesem Entwurf vollständig digital geplant und vorgefertigt (siehe Abbildung 1.23). Bauseits müssen nunmehr noch die Konsolanker maßgenau an das Versuchsgebäude gedübelt werden, die Montageeinheiten aus je 4 Teilen (Ring- und Lisenenstücke) zusammengeschaubt und in die Konsolen eingehängt werden sowie die gebrauchsfertigen und integrierten Tafeln eingehängt werden.



Abbildung 1.23: Vorgefertigte Fassadentafeln mit integrierten PV-Modulen (links), Lisenenstücke (mittig) und palettierte Fassadenmodule für den Transport (rechts).

1.2.2 Entwicklung eines Stromversorgungskonzepts für Fassaden mit integrierter organischer Photovoltaik; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Günter Kießling und M.Eng. Matthias Braun

Bei architektonischer Unterteilung einer Fassade in festgelegte Bereiche (Zimmer, Etagen, Fensterachsen) führt die Bestückung mit Photovoltaik zu vielen dezentralen Energieerzeugern kleiner Leistung. Für deren Integration müssen dazu passende Stromversorgungskonzepte entwickelt werden. Der bereits im Jahr 2018 entwickelte und 2019 technisch erweiterte Versuchstand zum praktischen Betrieb einer elektrisch aktiven Fassade mit gedruckter organischer Photovoltaik (OPV) wurde auch im Jahr 2020 weitergeführt.

Der Versuchsaufbau besteht aus einem PV-Generator, einem Solarladeregler, einem Akkumulator zur Energiespeicherung und individuell steuerbaren elektrischen Verbrauchern. Der PV-Generator besteht dabei aus 24 einzelnen semitransparenten OPV-Folien in länglicher Streifenform, die vom ZAE-Bayern hergestellt wurden. Zur Erfassung, Speicherung und Darstellung der relevanten Strom- und Spannungswerte, sowie der vorherrschenden Sonneneinstrahlung, wird ein selbst entwickeltes System aus einem Micro-Controller, einem Einplatinen-PC, Hall-Sensoren und einem Pyranometer eingesetzt. Betrieben wird der Versuchsaufbau im Maschinenlabor der TH-Nürnberg am Kesslerplatz. Dort sind die OPV-Streifen an der Innenseite eines großen Süd-West-Fensters angebracht.

Ein Hauptthema im vergangenen Versuchszeitraum 2020 am OPV Versuchsstand war die Anpassung der Verschaltung und Gruppierung der einzelnen OPV Module zur Leistungsoptimierung des PV-Generators.

Erstmaliger Handlungsbedarf zur Betriebsoptimierung zeigte sich bereits in den Wintermonaten 2019/2020. Anders als zum Start des Versuchsbetriebes in den Sommer- und Herbstmonaten 2019 zeichnete sich während des Betriebes ab, dass der PV-Generator in seiner damaligen Verschaltung, aufgrund der schlechteren Witterungsbedingungen (Bewölkung, Nebel) und der geringeren Strahlungsintensität die Spannungsschwelle für den MPP-Betrieb des Ladereglers nicht bzw. erst spät am Tag überschreiten konnte. Damit der Laderegler auch in den Wintermonaten im MPP-Modus arbeitet, wurde die Leerlaufspannung des PV-Generators durch eine Neugruppierung der Modulstrings erhöht. Die Schaltungsänderung konnte durch einfaches Umstecken der Anschlussleitungen auf der im Versuch eingesetzten Verschaltungsplatine mit wenig Aufwand durchgeführt werden, ohne dass die Verkabelung der Module verändert werden musste.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten bei der Verschaltung der OPV-Streifen zeigten sich hinsichtlich der lokal gegebenen Verschattungssituationen. Im Laufe eines Betriebstages treten auf der Generatorfläche verschiedene, durch den

Fenstersturz und die Laibungskanten der Außenmauer baulich bedingte Verschattungen auf. Damit die Leistungseinbußen des PV-Generators möglichst gering ausfallen, wurde die Stringzusammenstellung der 24 OPV-Streifen anhand der auftretenden Hauptschattenkanten ausgeführt. Insgesamt wurden bisher drei verschiedene Verschaltungsvarianten getestet, wobei der tägliche Ertrag deutlich gesteigert werden konnte.

Mit dem Baufortschritt und der Fertigstellung des neuen Bibliotheksgebäudes der TH-Nürnberg am Kesslerplatz hat sich herausgestellt, dass beim Betrieb von fassadenintegrierter Photovoltaik auch der Einfluss bestehender Nachbargebäude bzw. zukünftiger Bebauung unbedingt berücksichtigt werden muss, auch wenn diese vermeintlich weit genug entfernt stehen. Vor allem in den Monaten mit tiefstehender Sonne wird die Produktivität des im Erdgeschoss betriebenen Versuchsstandes durch den frühzeitigen Schattenwurf des Nachbargebäudes beträchtlich gemindert.



Abbildung 1.24: Außenansicht des mit OPV bestückten Fensters und des durch die Fensterlaibung und -sturz hervorgerufenen Schattenwurfes.

Während des Dauerbetriebes des Versuchsstandes zeigte sich, dass auch das eingesetzte Monitoringsystem noch an einigen Punkten überarbeitet werden muss. Da der im Aufbau eingesetzte Laderegler keine reinen Gleichgrößen, sondern zeitlich stark veränderliche Ströme und Spannungen erzeugt, wurde das Messsystem hinsichtlich der Messwerterfassung und –verarbeitung neu konzeptioniert. Um den Energieertrag der Anlage zukünftig genauer erfassen zu können, wird das Messsystem aktuell zu einer summierenden Messwertaufnahme mit Mittelwertbildung weiterentwickelt. Im Zuge der Neukonzeptionierung wird auch die Datenablage und der Speicherplatzverbrauch optimiert.

Neben dem auf einem Gleichstromnetz basierendem Stromversorgungskonzept besteht auch die Möglichkeit, die fassadenintegrierte Photovoltaik mittels Mikrowechselrichter direkt in das Wechselstromnetz des Gebäudes einspeisen zu lassen. Neben der Auslegung als Gesamtanlage könnte auch in Betracht bezogen werden, dass jede Wohn- bzw. Büroeinheit die erzeugte Energie direkt selbst nutzt und nur Überschüsse in das übergeordnete Etagen-Stromnetz einspeist.

Zu dieser Thematik ist am EnCN ein weiterer Versuchsaufbau im Aufbau, um die Hardware und das Betriebsverhalten einer Mikro-PV Anlage kleiner elektrischer Leistung zu testen. Dabei werden auch die derzeit gültigen elektrischen Installationsbestimmungen und Anschlussbestimmungen der Netzbetreiber in Franken recherchiert und per Befragung erhoben.



Abbildung 1.25: Montagerahmen für den Versuchsaufbau zum Betrieb einer Mikro-PV Anlage.

1.2.3 Entwicklung von Bilanzierungsmethoden für fassadenintegrierte PV-Elemente und energieadaptive Fassaden durch Systemsimulation; Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Maschinenbau / Versorgungstechnik; Prof. Dr. Arno Dentel, M.Eng. Christina Betzold, M.Sc. Susanna Bordin, Dipl.-Phys. Gunnar Harhausen, M.Eng. Johannes Hellmuth, M.Eng. Sebastian Hummel, M.Sc. Kutralingam Kandasamy, M.A. Marcel Neberich und Heike Weigand

Drei wichtige Säulen zur Umsetzung der Energiewende sind die Senkung des Energiebedarfs, die Steigerung der Effizienz sowie der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien. Der Gebäudebestand weist mit ca. 40 % einen hohen Anteil am Gesamtenergiebedarf in Deutschland auf, hat aber zugleich sehr hohes Potenzial zur Senkung. Der Gebäudesektor kann nahezu klimaneutral werden und damit zur Realisierung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung beitragen, wenn alle drei Säulen in Neubau und Bestand integriert werden. Die Gebäudefassade ist dabei ein wichtiger Baustein. Fassaden der Zukunft zeichnen sich durch eine hohe Dämmwirkung zur Minimierung der Wärmeverluste aus (Senkung des Wärmebedarfs) sowie durch die Integration von gebäudetechnischen Komponenten, z.B. fassadenintegrierte PV-Module (Erzeugung erneuerbarer Energien) aus. Durch intelligente, systemweite Kopplung und Regelung von Sonnenschutz, Raumtemperatur sowie Wärmeerzeugung und Speicherung wird die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert.

Vor diesem Hintergrund wird im Forschungsbereich „Entwicklung von Bilanzierungsmethoden für fassadenintegrierte PV-Elemente und energieadaptive Fassaden durch Systemsimulation“ u.a. das Forschungsprojekt „Fassade³“ bearbeitet. Ziel ist die Konzeption eines stromerzeugenden Fassadenelementes in modularer Bauweise sowie die Entwicklung von Methoden zur Integration in die Gebäudetechnik. Im Forschungsfeld der Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden und der Steigerung der Energieeffizienz von Gebäudetechnik hat sich im Rahmen des „Landesprogramms“ ein interdisziplinäres Forscherteam der TH Nürnberg am EnCN zusammengeschlossen, um gemeinsam an Systemlösungen für den Bau und Betrieb energieeffizienter Gebäude zu arbeiten. Die Steigerung der Energieeffizienz und Senkung des Energiebedarfs in kleinen und mittleren Unternehmen ist das Ziel des Forschungsprojekts „KMU|plus“, das gemeinsam mit dem Institut für Energie und Gebäude (ieg) der TH Nürnberg und weiteren Partnern bearbeitet wird.

Ebenfalls im Bereich Gebäude angesiedelt ist das 2020 begonnene Projekt „Wegweiser Gebäude 2050: Eine Planungs- und Entscheidungshilfe für nachhaltige Anlagen- und Gebäudekonzepte“. Hier werden energieeffiziente und zugleich wirtschaftliche Konzepte für Sanierung und Neubau untersucht und die Ergebnisse in einem praxisnahen Planungsleitfaden zusammengefasst. Ziel ist die bilanzielle Energieneutralität der Gebäude, welche im Wesentlichen durch möglichst wirtschaftlich betriebene PV-Anlagen an Fassade und Dach erreicht wird.

1.2.3.1. „Fassade³ – effizient – aktiv – modular: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad“; Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Günter Kießling, M.Sc. Susanna Bordin, M.A. Marcel Neberich, M.Sc. M. Ketterer, M.Eng. M. Braun

In der zweiten Förderphase des EnCN konnte durch Vorarbeiten im Rahmen des Teilprojekts „energieeffiziente Gebäudehülle“ das Forschungsprojekt „Fassade³ – effizient – aktiv – modular“ erfolgreich beantragt werden, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Das im Dezember 2017 gestartete Vorhaben wird durch die TH Nürnberg koordiniert und innerhalb eines interdisziplinären Verbunds aus Hochschule, Forschungseinrichtungen, u. a. dem ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., und mittelständischen Unternehmen bearbeitet. Der Zeitraum des Forschungsvorhabens wurde in 2020 um eine Laufzeit von sieben Monaten verlängert. Projektziele sind die Entwicklung und Demonstration eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad. Die Projektlaufzeit ist in drei Phasen unterteilt: i) eine Entwicklungs- und Planungsphase, ii) eine Umsetzungsphase und iii) eine Intensivmonitoringphase.

Im dritten Projektjahr lag der Fokus auf der Umsetzung des entwickelten Fassadenelementkonzepts. Zur Vereinfachung der Montagearbeiten im Werk, des Transports der Elemente und des Handlings auf der Baustelle wurde in Abstimmung mit GIP Fassade eine Änderung im konstruktiven Konzept vorgenommen. Die Fassadenelementtypen wurden in ihrer Breite reduziert, so dass die Fassade aus einem Fenster-Elementtyp und einem opaken Elementtyp modular zusammengesetzt werden kann. Zur Erprobung der mechanischen und elektrischen Kopplung der Fassadenelemente erfolgte die Errichtung eines Fassaden-Mock-up im INNOPARK Kitzingen. Der Testaufbau umfasst ein Fenster-Element und zwei opake Elemente (Abbildung 1.26). Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kießling (EnCN EFFIZIENZ) wurden die innovativen Komponenten der Projektpartner (nachhaltiger Dämmstoff, selektiv beschichteter Sonnenschutzbehang, Fassadenpanel mit organischer Photovoltaik -OPV) in die Fassadenelementrahmen in Kitzingen integriert. In diesem Schritt wurden ebenfalls Temperatursensoren im Fassadenaufbau installiert. Abschließend wurden die drei Fassadenelemente an die Südfassade eines Gebäudes im INNOPARK montiert und die OPV-Glasvordächer installiert. Während den Arbeiten am Mock-up wurden konstruktive Anpassungen für die Demonstrationsfassade abgeleitet und das Leitungsführungskonzept für die in die Fassade und das Glasvordach integrierte OPV optimiert. Des Weiteren wurde das Mock-up gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kießling, dem ZAE Bayern und der ifm software GmbH für einen Funktionstest erster Messtechnik genutzt. Diese umfasst die Messung von Strom und Spannung der OPV-Module und des Temperaturverlaufs im Fassadenaufbau. Zusätzlich wurde bereits Messtechnik für das geplante Innenraum-Monitoring in das Messsystem integriert und die Datenübertragung per Funk implementiert. Der Bau der Demonstrationsfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude im INNOPARK Kitzingen ist nun für das erste Halbjahr 2021 vorgesehen. In einem anschließenden Monitoring ist geplant, die Fassade elektrisch und thermisch zu untersuchen sowie den Einfluss der entwickelten Fassade auf die Energiebilanz einzelner Räume und auf deren Raumklima zu bewerten.



Abbildung 1.26: Fassaden-Mock-up mit integrierter Messtechnik, Standort INNOPARK Kitzingen.

1.2.4 Programm zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften – Fachhochschulen (Landesprogramm); Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Wolfram Stephan, Prof. Dr. Kießling, M.Eng. Sebastian Hummel, M.Sc. Kutralingam Kandasamy, Dipl.-Phys. Gunnar Harhausen, Heike Weigand, B.Eng. Kevin Zeyer, M.Eng. Jan Sebastian Hildebrand und Prof. Dr. Wolfgang Krömer

Zielsetzungen

Die Reduktion von klimaschädlichen Treibhausgasen ist eine wesentliche Maßnahme, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Dieses Ziel soll im Gebäudebereich zum einen durch die Erhöhung der Energieeffizienz der Systeme und zum anderen durch einen reduzierten Gebäudeenergiebedarf erreicht werden. Gebäude und Gebäudetechnik bieten hierzu ein enormes Potential, da 39 % der Endenergie für den Gebäudebetrieb aufgewendet werden. Somit stellen energieeffiziente Gebäude eine wichtige Säule der Energiewende dar.

Ein interdisziplinäres Forscherteam der Technischen Hochschule Nürnberg hat sich am Energie Campus Nürnberg (EnCN) zusammengeschlossen und arbeitet gemeinsam an Systemlösungen für den Bau und Betrieb energieeffizienter Gebäude. Das Team besteht aus vier Professoren aus unterschiedlichen Fakultäten (Maschinenbau und Versorgungstechnik, Elektro-, Feinwerk- u. Informationstechnik und Werkstofftechnik). Dadurch werden interdisziplinäre Kompetenzen aus dem Bereich der Gebäudetechnik, der Elektrotechnik, der Bauphysik und der Werkstofftechnik gebündelt (siehe Abbildung 1.27).

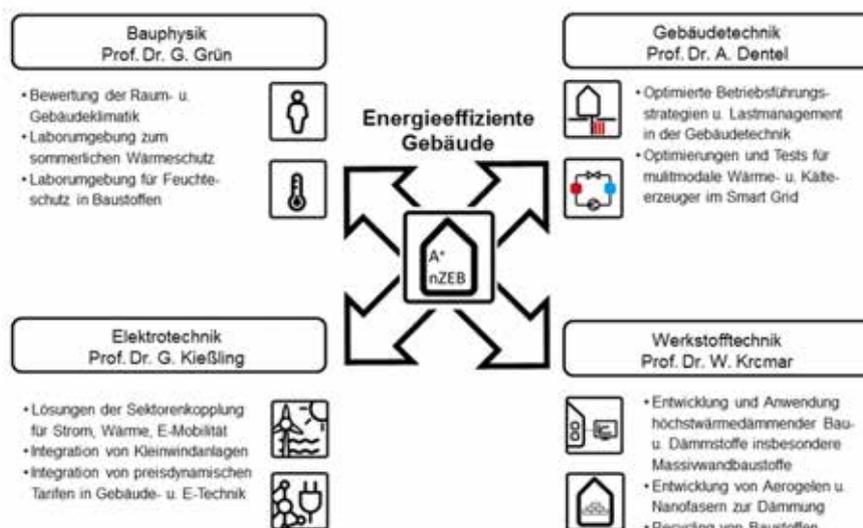


Abbildung 1.27: Forscherteam und inhaltliche Themen des Forschungsschwerpunkts Energieeffiziente Gebäude.

Die Effizienz und Integration regenerativer Energieerzeuger im Wohngebäudesektor kann sowohl durch eine stetige Optimierung von Betriebsführungsstrategien, als auch durch Energie- und Lastmanagementsysteme verbessert werden. Eine Prüfung unterschiedlicher Energieerzeuger im Rahmen eines Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstandes, in welchem die Energiebedarfe des Gebäudes simuliert und durch geeignete Thermostate emuliert werden, erlaubt die Bewertung und Optimierung dieser Algorithmen und Systeme im Labor. Wärmepumpen nehmen durch den zunehmenden elektrischen Anteil in der Energieversorgung einen wachsenden Stellenwert ein. Das Forscherteam Gebäudetechnik (Prof. Dr. A. Dentel) widmet sich daher verstärkt der ganzheitlichen Systemuntersuchung und -integration unterschiedlicher Wärmepumpentypen.

Klimakammer – Erweiterung eines Prüfstands

Im Rahmen der Programmsäule „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ wird ein bestehender Wärmepumpenprüfstand im THN-Technikum Rednitzhembach um eine Klimakammer erweitert. Mit dieser soll die Emulation beliebiger Außenklimata innerhalb des 60 m³ großen Prüfraumes ermöglicht werden. Der Emulationsprüfstand dient primär der Prüfung von luftgekühlten Wärmepumpen (Luft-Wasser-Wärmepumpen) nach aktuell gültigen Prüfnormen (DIN EN 14511). Strategisch wird die Klimakammer innerhalb des HiL-Prüfstandkonzeptes als

Wärmepumpenquelle mit nahezu realen und variablen Umgebungs- und Betriebsbedingungen eingesetzt, indem der Klimakammer transiente Umgebungsbedingungen vorgegeben werden. Die Umgebungsluft der Kammer kann in einem Bereich von -25 °C bis $+40\text{ °C}$ bei gleichzeitiger Anforderung an eine gewisse Luftfeuchtigkeit geregelt werden. Die Umgebungsluft wird hierzu im Umluftbetrieb mithilfe aller vier thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen (Kühlen, Erwärmen, Befeuchten und Entfeuchten) rekonditioniert.



Abbildung 1.28: Die Klimakammer im THN-Technikum in Rednitzhembach im Aufbau.

Der Aufbau der Klimakammer startete im Juli 2020 mit der Errichtung der eigentlich Tiefkühlzelle (siehe Abbildung 1.28 l.o.) auf einem Metallgrundrahmen. Im Anschluss wurden die Komponenten der Rekonditionierungsanlage an die Kammer angebracht (siehe Abbildung 1.28 r.o.). Durch beidseitig angebrachte Luftkanäle wird im Umluftbetrieb die aufzubereitende Kammerluft durch Auslässe angesaugt, im externen Klimagerät aufbereitet und auf der gegenüberliegenden Seite der Klimakammer durch Drallluftauslässe in den Raum eingebracht (siehe Abbildung 1.25 l.u.). Durch die Anordnung der Luftauslässe soll eine möglichst homogene Vermischung der Luft bei gleichzeitig niedriger Strömungsgeschwindigkeit gewährleistet werden. Voraussichtlich zu Beginn des 2. Quartals 2021 sollen reguläre Wärmepumpen- oder Systemprüfungen durchgeführt werden.

1.2.5 **KMU|^{plus} - Energy Intelligence: Entwicklung einer modularen Energiemanagement-Lösung für kleine und mittlere Unternehmen als Mehrwert im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation;** Technische Hochschule Nürnberg, 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

Das Forschungsprojekt „**KMU|^{plus} - Energy Intelligence: Entwicklung einer modularen Energiemanagementlösung für kleine und mittlere Unternehmen als Mehrwert im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation**“ (FKZ 03ET1621E) startet in Dezember 2018 im Rahmen der Forschungsinitiative „EnOB“-Energieoptimiertes Bauen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und hat eine Projektlaufzeit bis November 2022. Unter der Projektleitung von BUILD.ING

Consultants + Innovators GmbH, den weiteren Projektpartnern Trevisto AG, Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen und dem Praxispartner MC-Tech Metallbau GmbH, bearbeitet die Forschungsgruppe der Professoren Arno Dentel und Wolfram Stephan das Teilprojekt „Entwicklung von universellen Messsystemen und numerischen Prognosen für ein kostengünstiges EMS“.

Ziel des gesamten Forschungsprojekts 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 wie in Abbildung 1.29 dargestellt – sollen innerhalb des Projekts auf den Bedarf kleiner und mittlerer Unternehmen angepasst und an Hand eines Praxisbeispiels die erfolgreiche Durchführbarkeit demonstriert werden. Im vergangenen Förderjahr 2020 startete die Umsetzung einer mobilen und stationären Datenerfassung sowie der Kommunikationsinfrastruktur.

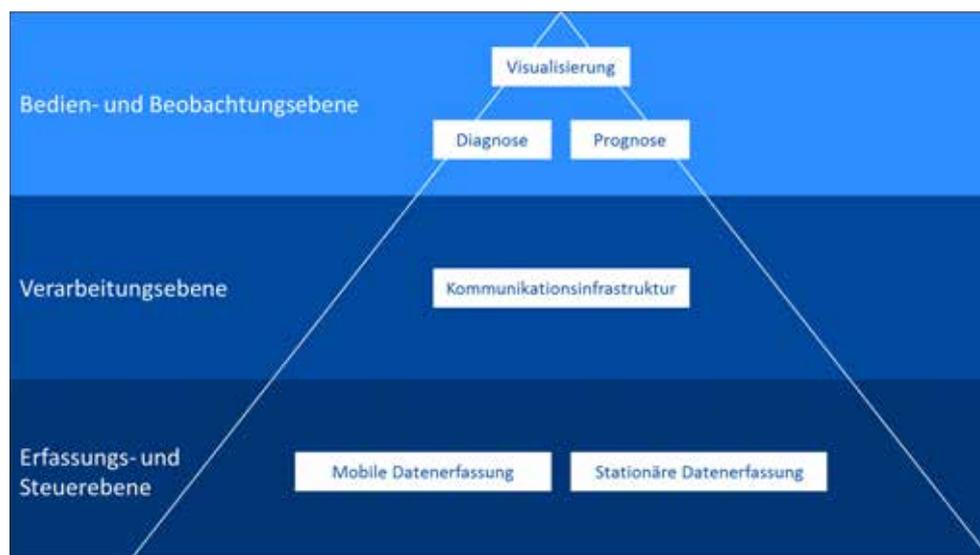


Abbildung 1.29: KMU|^{plus} Energy Intelligence Modell.

1.2.5.1 Kommunikationsinfrastruktur – autarkes Messnetzwerk und sichere Kommunikation

Da eine Steuerung und Regelung im Projekt nicht vorgesehen ist, wurde ein autarkes Computernetzwerk für die Erfassung der Messdaten installiert. Dies erhöht einerseits die Datensicherheit und verhindert andererseits auch einen ungewollten Eingriff bzw. Wechselwirkung mit dem Produktionsnetzwerk.

Für die lokale Persistierung der Daten wurde das Open Source Framework OGEMA (Open Gateway Energy Management) ausgewählt. OGEMA ist ein von drei Fraunhofer Instituten entwickeltes und durch das BMWi gefördertes Projekt. Der Projektpartner Fraunhofer IIS ist eines der entwickelnden Institute. Das Framework wird sowohl in der stationären, als auch in der mobilen Datenerfassung eingesetzt wie schematisch in Abbildung 1.30 dargestellt. Eine Übergabe der Messdaten beider Bereiche erfolgt über den Datenaustauschstandard OPC-UA (Open Platform Communications United Architecture). Dieser offene und Hersteller unabhängige Kommunikationsstandard im Industrie 4.0 Kontext erlaubt einen sicheren, verschlüsselten Datentransport mit zusätzlicher semantischer Beschreibung. Für die Persistierung und Weiterverarbeitung der Messdaten ist der Kooperationspartner Trevisto zuständig. Die komplette Architektur ist durch die Verwendung von OPC-UA und den Designentwurf cloudfähig und horizontal wie vertikal skalierbar, z.B. über mehrere Standorte anwendbar.

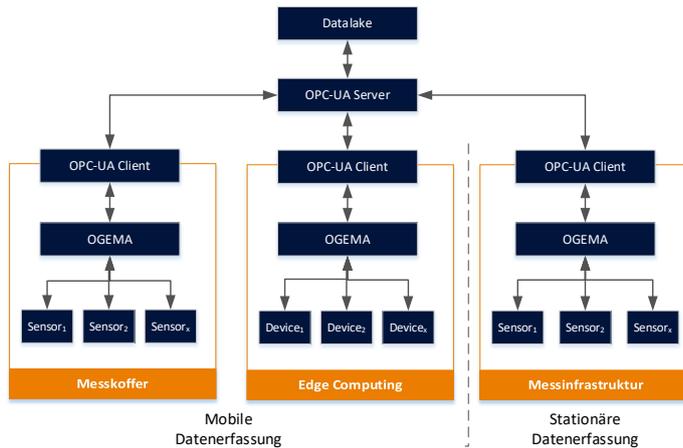


Abbildung 1.30: Konzept für die Kommunikationsinfrastruktur (links). Nachgerüstete Messtechnik, als Schaltschrankmodule in hoher Montagedichte mit digitaler Anbindung, WAGO Systembus mit zentralem Controller (rechts).

1.2.5.2 Umsetzung der Datenerfassung beim Praxispartner MC-Tech Metallbau GmbH

Für die stationäre Datenerfassung erfolgte eine detaillierte Planung und Konzeption der Messinfrastruktur. Potentielle Sensoren und relevante Komponenten, die auf dem Markt verfügbar sind, wurden recherchiert. Die vorhandene Messinfrastruktur erfasst die elektrische Energie an der Haupteinspeisung und den gesamten Erdgasverbrauch, in Form eines Smart Meters und eines analogen Gasbalkenzählers. Für das Projekt wurde zusätzliche Messinfrastruktur installiert. Alle wesentlichen elektrischen Verbraucher (hauptsächlich Werkzeugmaschinen) sowie die thermische Energie für die Gebäudeheizung und produktionsunterstützende Prozesse wie die Druckluftzerzeugung werden messtechnisch erfasst. Zusätzlich wird die Verbindung von Produktion und TGA untersucht, zum Beispiel die Energierückgewinnung aus der Abwärme der Druckluftproduktion in den Gebäudeheizkreislauf. Hierzu wurde zusätzliche Messinfrastruktur installiert.

Die Erfassung der einzelnen Messwerte erfolgt über eine eigene Kommunikationsinfrastruktur innerhalb der Verarbeitungsebene. Für die mobile Messinfrastruktur werden zwei verschiedene Konzepte verfolgt. Einerseits wurde damit begonnen, einen mobilen Messkoffer für Spotmessungen zu konzipieren. Andererseits wurde ein dezentrales Datenverarbeitungssystem als Edge Computing Konzept entworfen. In beiden Systemen basiert die lokale Persistierung der Daten auf dem Framework OGEMA und die externe Kommunikation auf dem Industrie 4.0 Protokoll OPC-UA. Die Umsetzung des Edge Computing erfolgt durch den Projektpartner Fraunhofer IIS, die Realisierung des Messkoffers erfolgt durch die THN.

1.3 Herzo Opt - Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung; Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. A. Dentel, Prof. Dr. G. Kießling, Prof. Dr. W. Krcmar, M.Eng. C. Betzold, M.Eng. K. Koutrouveli, M.Sc. C. Bauer und M.Eng. F. Kugler

In Projektphase 1 des Forschungsprojektes „Herzo Base - Energiespeicherhäuser - Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“ (FKZ 03ET1364A) wurden Planung, Bau sowie Intensivmonitoring mit Betriebsoptimierung umgesetzt. Mit dem Anschlussprojekt „Herzo Opt“ erfolgt derzeit die Durchführung eines energetischen Langzeitmonitorings des Reihenhauskomplexes über einen Zeitraum von drei Jahren mit zusätzlicher Begleitung der Arbeiten durch das Fraunhofer IBP. Darüber hinaus wird die Messdatenauswertung hinsichtlich weiterer Betriebsoptimierungen ausgewertet sowie die Erprobung der prädiktiven Regelungsstrategien fortgesetzt. Da das Forschungsvorhaben als Leuchtturmprojekt angelegt und durchgeführt wird, soll eine Umsetzbarkeit der Ergebnisse für andere Regionen in Deutschland ausgearbeitet werden.

1.3.1 Gebäudehülle: Monitoring der Wandbaustoffe

Im Projekt „Herzo Base“ in Herzogenaurach wurden unter anderem die Dämmeigenschaften von CALOSTAT, einem neuartigen Dämmstoff aus pyrogener Kieselsäure untersucht. Dazu wurden acht Reihenhäuser errichtet, wobei die Außenwände von vier Häusern nach dem Stand der Technik, in einschaliger Bauweise mit perlitgefüllten Hochlochziegeln der Stärke 42,5 bzw. 36,5 cm erstellt wurden. Die restlichen vier Reihenhäuser wurden mit einer zweischaligen Außenwand errichtet, die aus 30 cm starken perlitgefüllten Hochlochziegeln und 12 cm starken, mit CALOSTAT gefüllten Vorsatzschalen, besteht. Der Aufbau der Wände in den Gebäudehüllen ist in Abbildung 1.31 dargestellt.

Haus 8 1 P	Haus 7 2 P	Haus 6 3 P	Haus 5 4 P	Haus 4 4 C	Haus 3 3 C	Haus 2 2 C	Haus 1 1 C
Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$	Solaroberputz $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$
Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe	Armierungs- spachtel mit Gewebe
Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$
Wärme- dämmputz them 76, $\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Wärme- dämmputz them 76 $\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$					
Perlit-Ziegel T7 42,5 cm $\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$	Perlit-Ziegel T7 42,5 cm $\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$	Perlit-Ziegel T7 36,5 cm $\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$	Perlit-Ziegel T7 36,5 cm $\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$	Calostat- WDF 12 cm Perlit-Ziegel T8 30 cm, $\lambda = 0,08$	Calostat- WDF 12 cm Perlit-Ziegel T8 30 cm, $\lambda = 0,08$	Calostat- WDF 12 cm Perlit-Ziegel T8 30 cm, $\lambda = 0,08$	Calostat- WDF 12 cm Perlit-Ziegel T8 30 cm, $\lambda = 0,08$
Normale Wärmebrücken	Normale Wärmebrücken	Wärmebrücken- optimierung	Normale Wärmebrücken Mörtel-Pads	Normale Wärmebrücken	Normale Wärmebrücken	Normale Wärmebrücken	Normale Wärmebrücken
Innenputz pluscalc 381 $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips- Innenputz IP 23 F $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$
Solance	Silikatfarbe	Solance	Silikatfarbe	Silikatfarbe	Solance	Silikatfarbe	Solance
$U = 0,152$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,155$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,179$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,178$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,132$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,132$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,132$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$	$U = 0,130$ $\text{W/(m}^2\text{K)}$

Abbildung 1.31: Wandaufbau der einzelnen Reihenhäuser mit berechneten U-Werten.

Im Rahmen des Projektes „Herzo Opt“ wird u.a. auch das thermische Verhalten der Wandbaustoffe ständig detektiert und in das Langzeit-Monitoring integriert. Dabei werden wichtige Messwerte im Wandaufbau wie Temperatur, relative Luftfeuchte und Wärmestromdichte kontinuierlich erfasst, gespeichert und mittels der Software Monisoft ausgewertet. Da sich die Ergebnisse des Monitorings für die Häuser gleicher Bauweise kaum unterscheiden, genügt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der verschiedenen Bauweisen.

Zu diesem Zweck wurden die Temperaturverläufe in den Wänden von Haus 4, exemplarisch für die zweischalige Bauweise aus CALOSTAT-gefüllten Vorsatzziegeln und perlitgefüllten Hochlochziegeln mit den Ergebnissen aus Haus 5, exemplarisch für die einschalige Standard-Bauweise mit perlitgefüllten Hochlochziegeln, verglichen. Abbildung 1.32 und Abbildung 1.33 zeigen die zugehörigen Temperaturverläufe in den Wänden der genannten Häuser über einen Zeitraum von 2 Jahren und 2 Monaten vom 01.04.2018 bis 30.06.2020.

Für die über den gewählten Zeitraum betrachteten Temperaturverläufe in den Gebäudewänden lässt sich allgemein festhalten, dass die Temperaturen an den außenliegenden Sensoren im Sommer sehr viel stärker zwischen Tag und Nacht schwanken, als dies im Winter der Fall ist. Die Außentemperaturen schwanken im Sommer durchschnittlich um die gewünschte Raumtemperatur, wenn auch mit größerer Amplitude als im Winter. Im Winter liegen die Außentemperaturen tendenziell deutlich unterhalb der Raumtemperaturen, während die Amplituden der Außentemperatur-Schwankungen geringer sind als im Sommer.

Dieser Sachverhalt führt zu einer Annäherung der gemessenen Temperaturen über die Wanddicke in den wärmeren Monaten dagegen zu einer Temperatur-Aufspreizung während der kalten Monate. Im Frühjahr und im Herbst zeigen sich sukzessive Temperatur-Übergänge zwischen beiden Extremen.

Vergleicht man die Temperaturen der im Innenputz verbauten Sensoren T1 (rot) der beiden Bauweisen, so treten insbesondere zwei Unterschiede der verschiedenen Bauweisen hervor. Erstens schwanken die Temperaturen im Innenputz der einschaligen Bauweise von Haus 5 (Abbildung 1.33) über einen Tag stärker, als dies bei der zweischaligen Bauweise von Haus 4 (Abbildung 1.32) der Fall ist. Zweitens ist zu erkennen, dass in den Wintermonaten die Temperaturen auf der Innenseite von Haus 5 (Abbildung 1.33) mit einschaliger Bauweise, stärker durch die äußeren Witterungsbedingungen beeinflusst werden, als dies bei der zweischaligen Bauweise von Haus 4 (Abbildung 1.32) der Fall ist. Dieser Sachverhalt tritt durch die niedrigeren Wandtemperaturen der einschaligen Bauweise während der Wintermonate zu Tage. Beide Effekte sind auf die extrem gute Dämmwirkung des CALOSTAT in der Vorsatzschale der Gebäude mit zweischaliger Bauweise zurückzuführen.

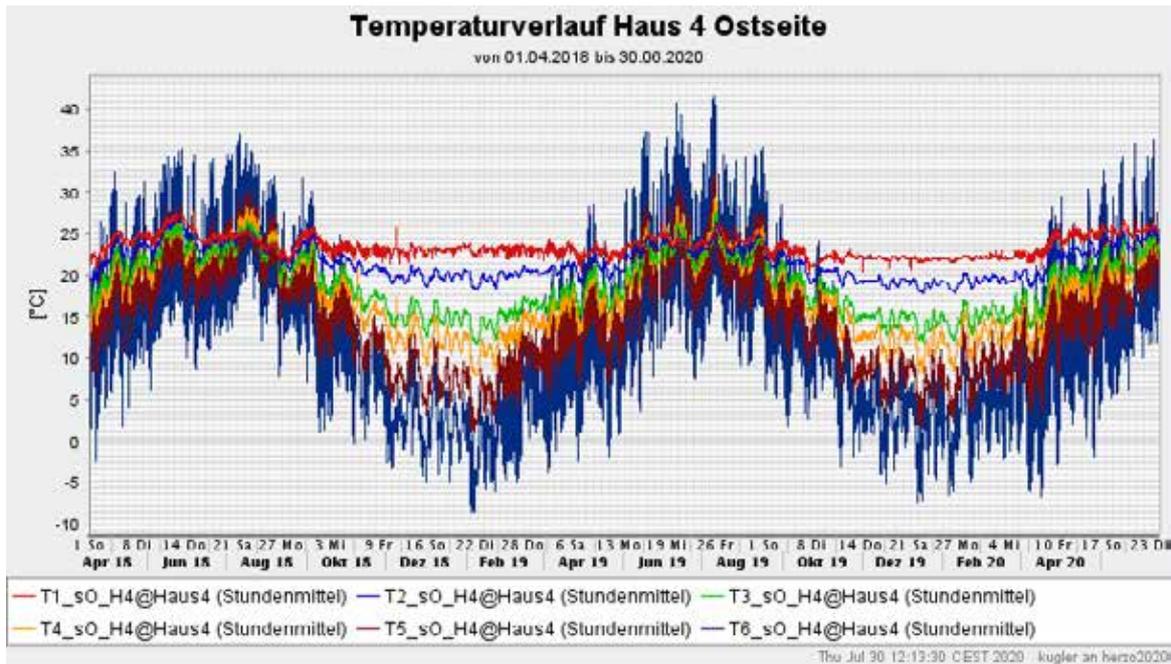


Abbildung 1.32: Temperaturverläufe in der Ost-Wand des Reihenmittelhauses 4 (zweischalige Bauweise) über zwei Jahre und zwei Monate von Anfang April 2018 bis Ende Juni 2020.

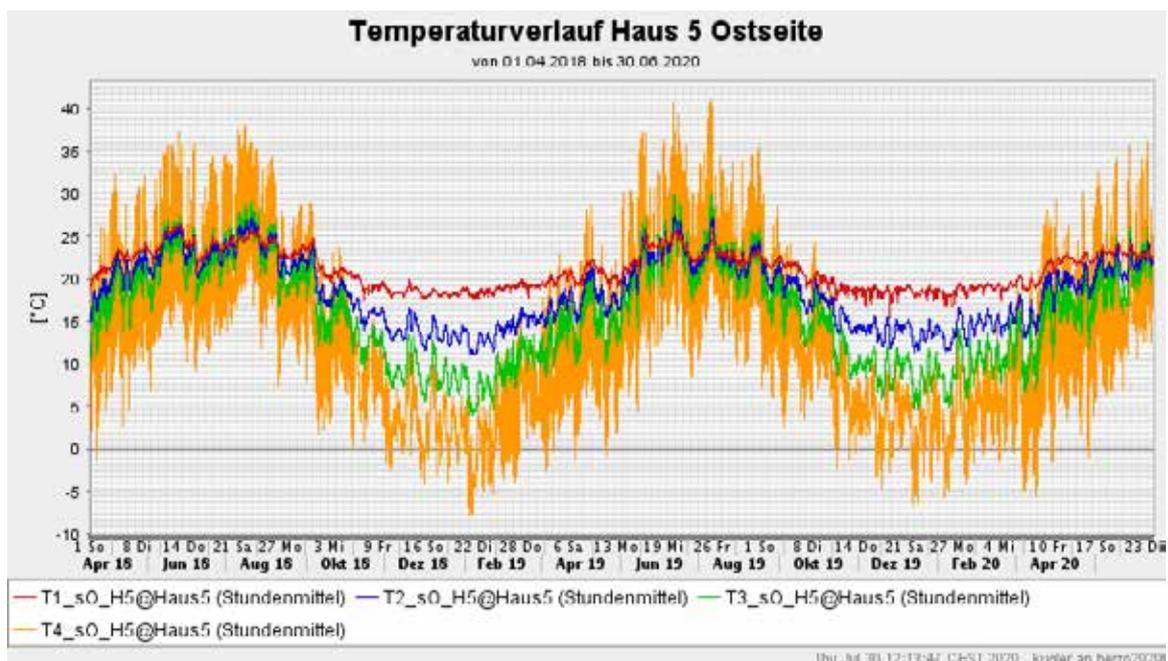


Abbildung 1.33: Temperaturverläufe in der Ost-Wand des Reihenmittelhauses 5 (einschalige Bauweise) über zwei Jahre und zwei Monate von Anfang April 2018 bis Ende Juni 2020.

1.3.2 Gebäudetechnik: Monitoring und Betriebsoptimierung

Die Gebäudetechnik umfasst das energetische Monitoring sowie die Betriebsführung und –optimierung der Anlagenkomponenten. Die Bearbeitung dieser Themen erfolgt durch ein interdisziplinäres Team aus den Bereichen Elektro- und Gebäudetechnik

1. Energetisches Monitoring

Die Datenaufzeichnung und Auswertung ermöglicht eine weitreichende und ausführliche Beobachtung des Gebäudes und dessen Verhalten über mehrere Jahre. Der Einfluss von jährlichen Wetterschwankungen und der Bewohner auf das Verhalten der Gebäude und der Anlagentechnik soll untersucht werden.

Beim Vergleich von zwei Monitoringperioden fällt auf, dass die jährliche PV-Nutzung vor Ort in der zweiten Periode um 12,5 % höher ist. Dies führte auch zu einem höheren Autarkiegrad von 37 % und einem höheren PV-Eigenverbrauch von 65 % im Vergleich zum ersten Zeitraum von 32 % und 61 % (siehe Abbildung 1.34). Der Haupteffekt für den höheren PV-Verbrauch vor Ort ist die Verwendung einer PV-geführten Regelungsstrategie über 12 Monate in der zweiten Monitoringperiode.

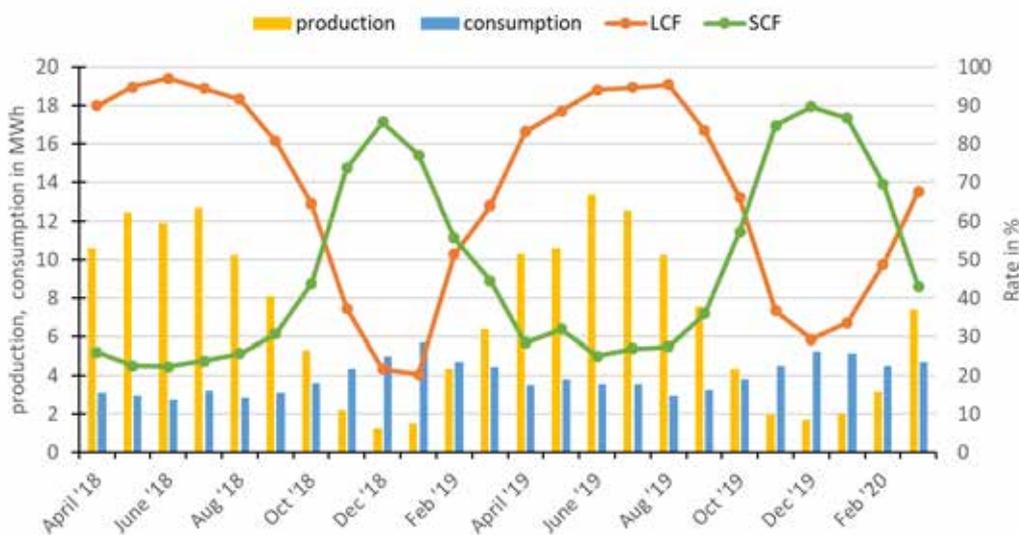


Abbildung 1.34: Monatliche PV-Produktion, Gesamtstromverbrauch sowie PV-Eigenverbrauch (SCF) und Autarkiegrad (LCF).

2. Betriebsführung und –optimierung der Anlagentechnik

Der weitere Aspekt der Gebäudetechnik umfasst die fortlaufende Betriebsführung und –optimierung der Anlagentechnik. Zum einen wird eine modellprädiktive Steuerung implementiert und die dafür notwendigen Lastprognosen anhand verschiedener Methoden ermittelt. Zum anderen werden durch die Auswertung des Monitorings Einstellungen und Parameter identifiziert, um den Anlagenbetrieb zu optimieren.

Erstellung von Lastprognosen

Für die Prognose der elektrischen Haushaltslast wurden erstmals statistische Prognosemodelle erstellt. Die Methoden Holt-Winters, Arima (AR) und Vektorautoregression (VAR) wurden getestet und anschließend mit Prognosemethoden auf Basis von neuronalen Netzen wie LSTM (long short term memory) verglichen. Die folgende Tabelle fasst die Fehler der jeweiligen Prognosemethode zusammen.

Tabelle 5: Qualität der getesteten Prognosemodelle im Vergleich.

Modell	Holt-Winters	AR(96)	VAR(96)	LSTM
Mittelwert [Wh]	991,5	991,5	991,5	991,5
RMSE [Wh]	314,8	341,7	346,1	453,6

Insbesondere die Holt-Winters Methode erzielte vergleichsweise gute Ergebnisse wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist.

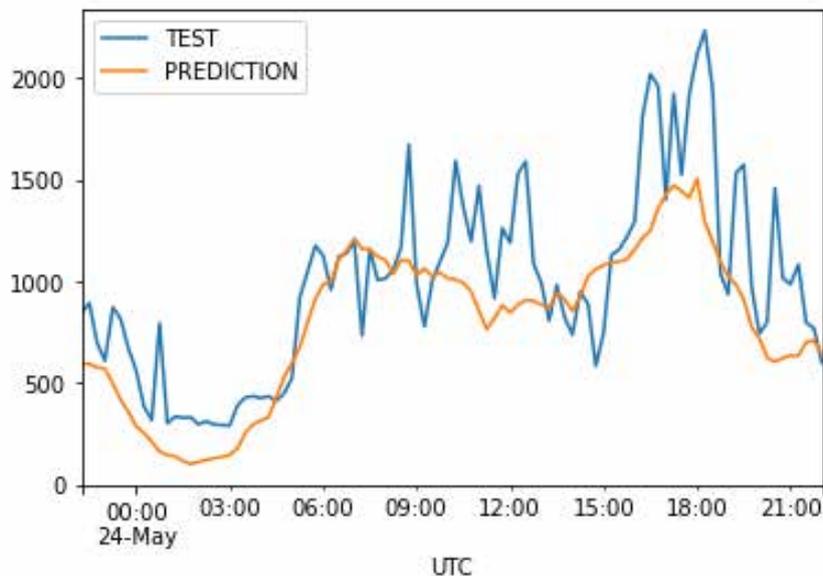


Abbildung 1.35: Holt-Winters Prognose der elektr. Haushaltslast in Wh (Blau: Vergangenheit, Orange: Testdaten).

Dennoch muss berücksichtigt werden, dass ein Fehler bei der Prognose des Lastprofils der elektrischen Haushaltslast von etwa 32 % signifikant ist. Wegen einem starken stochastischen Anteil kann das Profil der elektr. Haushaltslast bezüglich seines genauen Zeitverlaufs nicht fehlerfrei prognostiziert werden. Bei der am Tag voraussichtlich verbrauchten Energie ist die Prognose wesentlich genauer.

Betrieb einer modellprädiktiven Steuerung

Die Fortführung und Weiterentwicklung der Betriebsführungsstrategie bietet Potential, um den Betrieb der Wärmepumpenanlage und des Batteriespeichers zu optimieren. Hierbei wurde die prädiktive modellbasierte Steuerung (MPC) aus Projektphase 1 weiterentwickelt und mit dem Optimierungsziel zur Minimierung der Betriebskosten im Reihenhaus-Komplex angewandt. Die Prognosen für thermische, elektrische und Warmwasserlast wurden mittels künstlicher neuronaler Netze erstellt, die mit Monitoringdaten der letzten 12 Monate trainiert wurden. Der reale Betrieb der MPC erfolgte in Testphasen über mehrere Stunden, um die Ergebnisse der MPC und das Verhalten der Wärmepumpen überwachen zu können. Der gleitende Optimierungshorizont beträgt 23 Stunden mit einer Optimierung im 15 Minuten-Intervall. Das Setzen der Sollwerte aus der MPC erfolgte für die zwei Heizungswärmepumpen sowie acht Warmwasser-Wärmepumpen alle 15 Minuten. Während der Speicherbeladung konnte die MPC-Vorgabe durch die Heizungswärmepumpen gut umgesetzt werden. Bei Reduzierung der Heizleistung während der Speicherentladung wurden die Heizungswärmepumpen häufiger durch deren interne Regelung aufgrund von Sollwertüberschreitungen ausgeschaltet. Bei weiteren MPC-Betrieben wird der Einfluss der internen Regelung berücksichtigt.

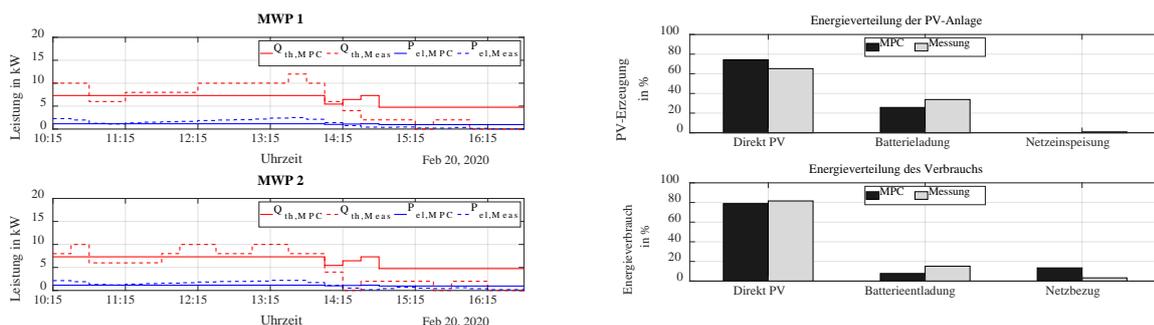


Abbildung 1.36: Betrieb der Heizungswärmepumpen nach MPC-Vorgabe sowie Energiebilanz über die sieben Betriebsstunden.

Steigerung der Batterieeffizienz

Mit einer angepassten Lade- und Entladeleistung eines elektrischen LiFePO₄ Speichers mit einer Kapazität von 40 kWh soll im 8-Familien-Reihenhauskomplex Herzo Base die Effizienz des PV-Speichersystems mit einer Erzeugungsleistung von 87 kWp optimiert werden. Mittels Simulation wurde im Zeitraum vom 01. März bis zum 31. Oktober das Betriebsoptimum bei einer maximalen solaren Ladeleistung von 9 kW, statt den voreingestellten 18 kW ermittelt. Berücksichtigt wurden dabei neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch die Charakteristika der Batterie. Wichtig war unter anderem, dass die Batterie im betrachteten Zeitraum an möglichst vielen Tagen vollgeladen wird. Im realen Betrieb wurde bei dieser einfach umsetzbaren Maßnahme der halbierten Ladeleistung eine Effizienzsteigerung um 3,0 % mit einem Vertrauensintervall $\pm 1,0 \%$ und eine Kostensenkung bis zu 70 €/Jahr in der Praxis realisiert. Diese Effizienzsteigerung wurde im Feldtest quantifizierbar nachgewiesen, anhand von vergleichbaren Monaten der vorausgegangenen 2 Jahre auf Basis verschiedener Ähnlichkeitskriterien^[1].

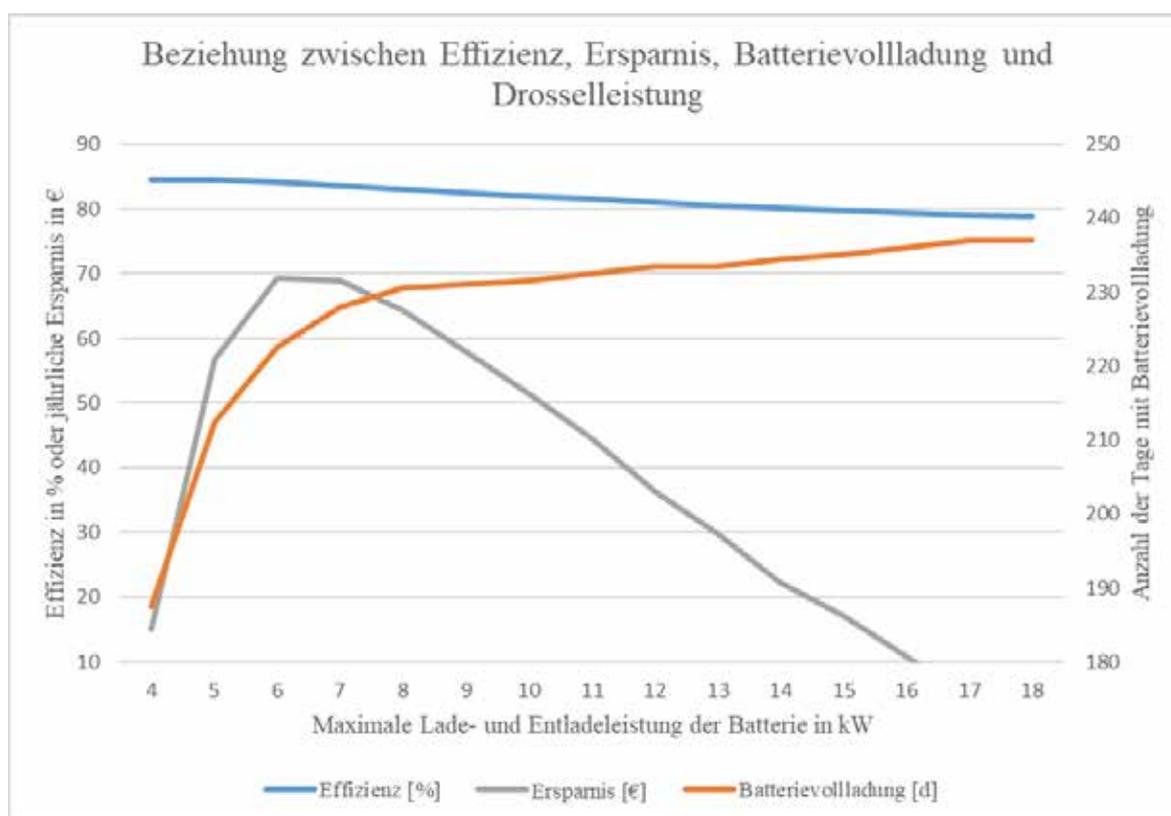


Abbildung 1.37: Beziehung zwischen Effizienz, Ersparnis, Batterievollladung und Drosselleistung.

1.4 Wegweiser Gebäude 2050: Eine Planungs- und Entscheidungshilfe für nachhaltige Anlagen- und Gebäudekonzepte (gefördert durch die STAEDTLER-Stiftung); Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Arno Dentel, M.Eng. Christina Betzold, Dipl.-Ing. (FH) Mario Franz

Für Klimaschutz und Energiewende ist der Gebäudesektor einer der gewichtigsten Bereiche. Der gebäuderelevante Endenergiebedarf über alle Sektoren macht bundesweit einen erheblichen Anteil des gesamten Endenergieverbrauchs aus. Im Jahr 2016 umfasste der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser ca. 33 % am Gesamtendenergieverbrauch in Deutschland [1]. Zugleich liegt hier ein enormes und vergleichsweise leicht mobilisierbares Optimierungspotenzial, denn bei vielen älteren Gebäuden kann der bestehende hohe Energieverbrauch durch eine effiziente Sanierung um bis zu 75 % gesenkt werden [2]. Diese Maßnahmen sind - sinnvoll kombiniert und gut geplant - meist wirtschaftlich.

Jedoch ist eine systematische Untersuchung von energieeinsparenden, zugleich möglichst wirtschaftlichen Maßnahmen aufwendig und für Bauherren im Ein- und Mehrfamilienhausbereich häufig zu teuer. Daher werden oftmals nur "übliche"

und wenig engagierte Maßnahmen verwirklicht, ein Großteil des Optimierungspotenzials bleibt ungenutzt. Zudem wird graue Energie (Energieeinsatz für Produktion, Transport und Entsorgung) meist nicht berücksichtigt.

Dieses Projekt will hier maßgeblich unterstützen, das Optimierungspotenzial von energieeinsparenden Maßnahmen in Kombination mit effizienten technischen Anlagen und der Integration von erneuerbaren Energien trotz der Hemmnisse zu aktivieren. Hierfür wird eine Planungs- und Entscheidungshilfe für nachhaltige Anlagen- und Gebäudekonzepte entwickelt, die Gebäudestandards und Anlagentechnologien auf dem heutigen Markt untersucht und auf die Klimaziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 hin bewertet.

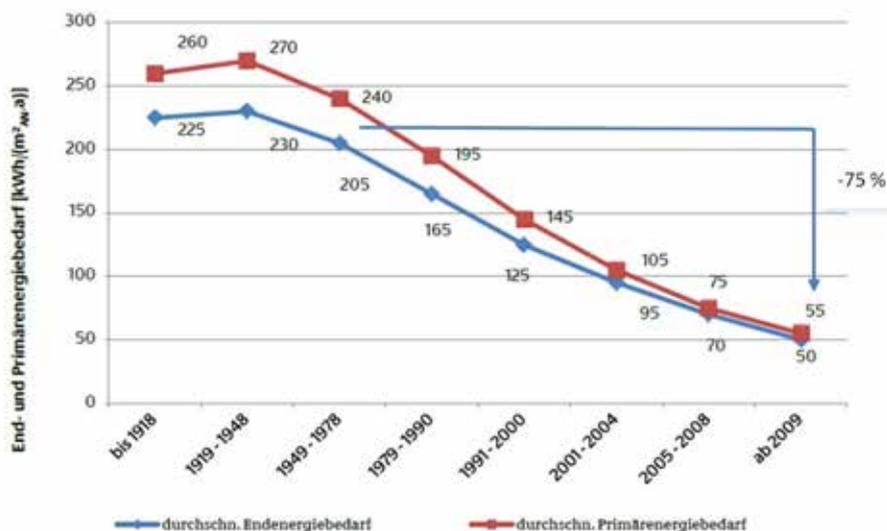


Abbildung 1.38: Durchschnitt des End- und Primärenergiebedarfs nach Baualter (gewichtetes Mittel über Gebäudegrößen).

Das Projekt nimmt sich der Thematik der ganzheitlichen Bewertung von Gebäude- und Anlagenkonzepten an. Auf Basis von Simulationsrechnungen (bauphysikalisch, anlagentechnisch) wird eine systematische Studie mit zahlreichen Varianten erstellt, mit dem Ziel für eine Reihe von üblichen Ausgangssituationen einen jeweils optimalen Sanierungspfad (energetisch, monetär, ökologisch) zu ermitteln. Die Varianten umfassen verschiedene Gebäudestandards (Energieeinsparverordnung EnEV, ab 2021 abgelöst durch das GebäudeEnergieGesetz GEG, Förderbedingungen der Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW, z.B. „KfW Effizienzhaus 55“) sowie verschiedene Anlagentechnologien (z.B.: Wärmepumpen, PV-Anlagen).

Basis der Studie ist eine sehr realitätsnahe Gebäude- und Anlagensimulation. Parallel werden jedoch Berechnungen konform der EnEV (bzw. GEG) durchgeführt, welche einerseits für die ordnungsrechtlichen Anforderungen der meisten Maßnahmen relevant sind, zudem aber auch für eine Reihe von Fördermöglichkeiten für engagiertere Effizienzziele (KfW Effizienzhaus etc.) anzuwenden sind. Die EnEV (bzw. das GEG) berücksichtigt jedoch nur rein energetische Aspekte von z.B. Heizungsanlage, Warmwasserbereitung, ggf. PV-Anlage, auf Basis der Jahresbilanz der Primärenergie. Ganzheitlichere, komplexere Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Netzdienlichkeit oder Autarkie bleiben unberücksichtigt. Die geplante Studie soll diese Lücke deutlich schmälern. Die aus der Studie abgeleitete Planungs- und Entscheidungshilfe stellt klar dar, welche Aspekte der detaillierten Ergebnisse im Rahmen der EnEV anrechenbar sind, und welche außerhalb davon bewertet werden müssen. Somit kann der Nutzer klar und sachlich zwischen ordnungsrechtlichen, energetischen, monetären und nachhaltigen / sonstigen ggf. system- oder zukunftsrelevanten Aspekten unterscheiden.

Die Planungs- und Entscheidungshilfe wird in einem leicht verständlichen Leitfaden formuliert. Kernstück des Leitfadens ist eine "Ergebnismatrix", aus welcher die definierten Bewertungskriterien (z.B.: Effizienz, Wirtschaftlichkeit usw.) aller erstellten Maßnahmen und Kombinationen übersichtlich abzulesen sind. Der Leitfaden soll somit Antworten auf die Wahl von Baustoffen, Anlagentechnik, Energieverbrauch, Energieertrag, grauer Energie und Wirtschaftlichkeit liefern. Diese Ergebnismatrix kann später in konkreten Bau-/Sanierungsprojekten als Ausgangspunkt und Wegweiser für Planer und Bauherren dienen, welche dann mit geringem Aufwand die projektspezifisch nötigen Detailplanungen durchführen und optimale Ergebnisse erzielen können. Eine Vorauswahl aus wenigen infrage kommenden effizienten Varianten auf Basis der Ergebnismatrix hilft dem Planer, unnötige Umwege und breite (aber oberflächliche) Untersuchungen an ineffizienten

Varianten zu vermeiden. Auch der Bauherr profitiert von der Ergebnismatrix, da er sich hier unabhängig eine Orientierung verschaffen kann. Der Leitfaden dient dem Bauherrn als eine neutrale und nachvollziehbare Informationsquelle und versetzt ihn in die Lage, einem Planer bzw. Energieberater auf Augenhöhe zu begegnen und mutmaßlich schlechte/ oberflächliche Vorschläge zu erkennen. Die Planungsqualität wird dadurch verbessert, im Endresultat entstehen effizientere, wirtschaftliche und klimafreundlichere Gebäude.

Neben dem individuellen Nutzen für private Hausbesitzer, Bauherren, Handwerker und Energieberater wird durch die Studie das gesellschaftliche Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung unterstützt.

Das Projekt gliedert sich in die Arbeitspakete

- Definition des energetischen Standards von typischen Gebäuden (3 Monate)
- Definition von technischen Energiekonzepten (3 Monate)
- Simulationsstudie (5 Monate)
- Erstellung einer Bewertungsmatrix (4 Monate)
- Erstellung einer Planungs- und Entscheidungshilfe (2 Monate)

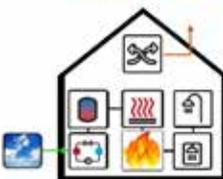
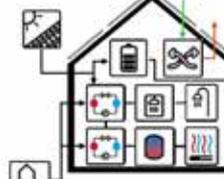
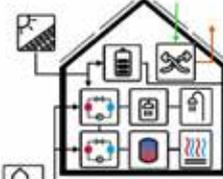
Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
EnEV 2016	KfW-55	KfW-40 Plus	Klimaneutral
Referenz-Variante 			
	-54%	-98%	-99%
Primärenergiebedarf	-63%	-98%	-99%
Endenergiebedarf	-12%	-61%	-66%
Nutzenergiebedarf	-16%	-70%	-77%
Heizwärmebedarf	-50%	-98%	-99%
CO ₂ -Emissionen	99,225 €	371,743 €	407,371 €
Mehrinvestitionskosten	6 €/kgco ₂	11,5 €/kgco ₂	12,5 €/kgco ₂
CO ₂ -Vermeidungskosten			

Abbildung 1.39: Mögliche Struktur einer Bewertungsmatrix (Vorarbeit 2018).

[1] „Energieeffizienz in Zahlen - Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, 2018.

[2] „dena-Gebäudereport - Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand,“ Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2016.

1.5 Interaktive Gebäudevisualisierung; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Informatik, Prof. Dr. Florian Gallwitz und M.Sc. Michael Lechner

Das Ziel der Arbeiten in diesem Arbeitspaket ist es, mit Hilfe von an Flugrobotern (Drohnen) befestigten Thermografie Kameras die thermischen Verluste von Gebäuden zu erfassen und zu visualisieren.

Im Berichtszeitraum wurde der Datensatz an hochauflösenden optischen und thermografischen Drohnen-Videoaufnahmen auf aktuell 28 Gebäude erweitert, darunter Hochschul- und Universitätsgebäude, Rathäuser, Schulen, Behörden, historische Gebäude und Einfamilienhäuser. Um möglichst konsistente Aufnahmen zu erhalten, wurde jedes Gebäude im gleichen Muster abgeflogen. Die Aufnahmen wurden unter möglichst einheitlichen Bedingungen erstellt: Im Winter, vor Sonnenaufgang, in einem Abstand von 4 bis 12 Metern und nach Möglichkeit an Tagen, an denen es am Vortag nicht geregnet hatte.

Um die bislang unbefriedigende automatische Synchronisation zwischen optischen und thermografischen Videos zu verbessern, erfolgte zu Zeit ein Umbau der Bildregistrierungspipeline, welche die Zuordnung zwischen Wärmebildern und optischen Aufnahmen ermittelt. Da die beiden Kameras nicht fest an der Drohne montiert sind, sondern zur Bildstabilisierung separat an Gimbals (motorisierten kardanischen Bildstabilisatoren) aufgehängt sind, muss diese Zuordnung für jedes Bild Paar separat ermittelt werden. Durch den Einsatz von Flownet, eines auf Deep Learning basierenden Verfahrens zur Berechnung des optischen Flusses, versprechen wir uns hier ein erhebliches Verbesserungspotential. Anstatt wie bislang einen evolutionären Algorithmus zur Bestimmung der initialen Bildposition einzusetzen, setzen wir nun auf eine spezielle parametrische Modellierung der Kameras, welche die mit den Gimbals verbundenen Freiheitsgrade beinhaltet. Unter realistischen Annahmen (Vorhandensein planarer Flächen, ausreichend vielen Merkmalen zur Bestimmung der Fluchtpunkte im Bild) kann so die Rotation der Kameras präzise ermittelt werden.

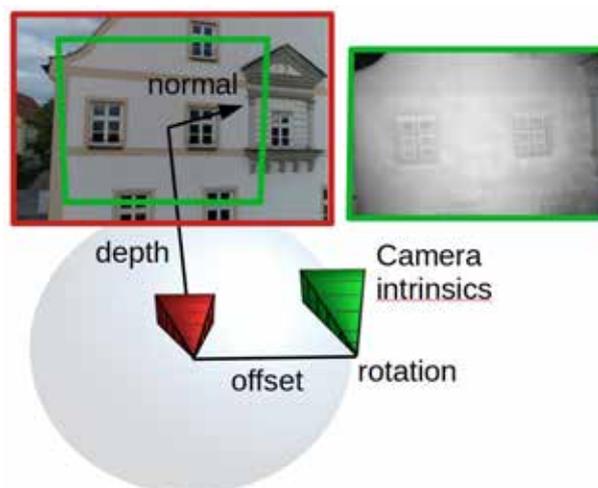


Abbildung 1.40: Bildregistrierung (optische Aufnahme mit größerem Bildwinkel links, Thermografieaufnahme aus der gleichen Drohnenposition mit engerem Bildwinkel rechts) unter Einsatz der speziellen Kameramodellierung.

Neben den beiden auf Gimbals aufgehängten Kameras verfügt die im Projekt eingesetzte Drohne DJI Matrice M210 noch über eine fest verbaute Stereokamera. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, die Distanz zur Gebäudefassade per stereoskopischer Tiefenschätzung zu ermitteln und diese Information in der Verarbeitungspipeline zur Bildregistrierung zu nutzen. Wie erwartet, wird dieses Vorgehen allerdings durch Reflexionen an der Gebäudefassade und insbesondere durch Fenster erschwert.

Im Berichtszeitraum wurden zunächst verschiedene Verfahren zur Entfernung von Reflexionen aus der wissenschaftlichen Literatur untersucht, um dieses Problem zu beheben. Es zeigte sich hierbei, dass diese keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, da diese Verfahren die Reflexionen nur abschwächen und erhebliche Fehler und Artefakte in der Tiefenkarte nicht verhindern.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Verfahren entwickelt, das Reflexionen mit hoher Zuverlässigkeit ermittelt. Voraussetzung ist allerdings, dass es sich nicht um eine vollverspiegelte Fassade handelt. Die Erkennung der Reflexionen basiert auf der Tatsache, dass sich reflektierte Bildanteile im Video in eine andere Richtung bewegen als die

Fassadenelemente. Durch Registrierung von Videoabschnitten und auf Basis des optischen Flusses können so Reflexionen bei der Tiefenschätzung verworfen werden. Mittels einer Ausreißerererkennung wird das so ermittelte Tiefenbild anschließend noch von Artefakten befreit und wie in Abbildung 1.41 dargestellt in die Verarbeitungskette einbezogen.

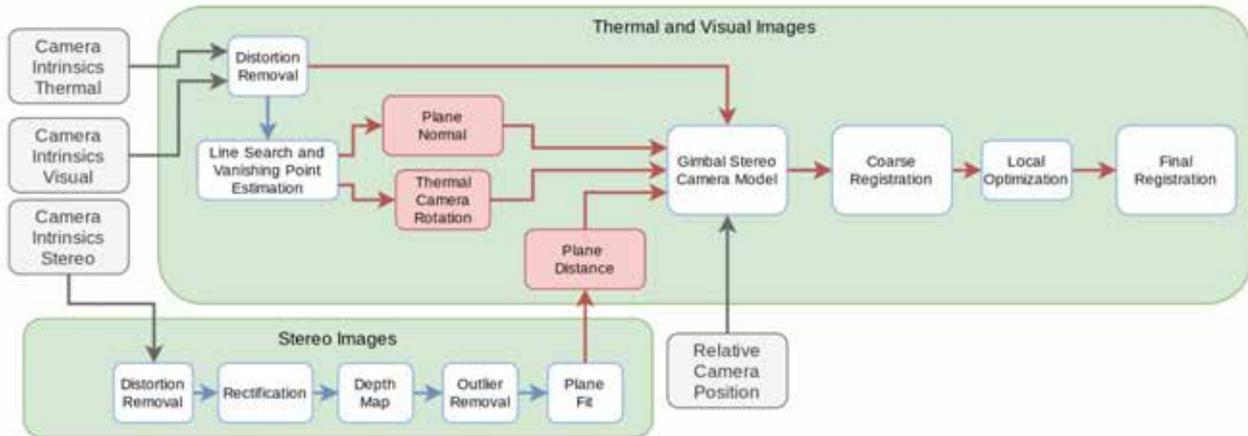


Abbildung 1.41: Die Verarbeitungspipeline zur Registrierung der thermischen und optischen Videoaufnahmen unter Einbeziehung der Stereokamera im Überblick.

1.6 Strategische Entwicklung der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“

Der Forschungsschwerpunkt EFFIZIENZ im EnCN setzt sich aus den beiden Arbeitsgruppen „Energieeffiziente Gebäude“ und „Energieeffiziente Industrie“ zusammen. Nachfolgend wird die geplante, strategische Weiterentwicklung der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“ dargestellt (Abbildung 1.42):

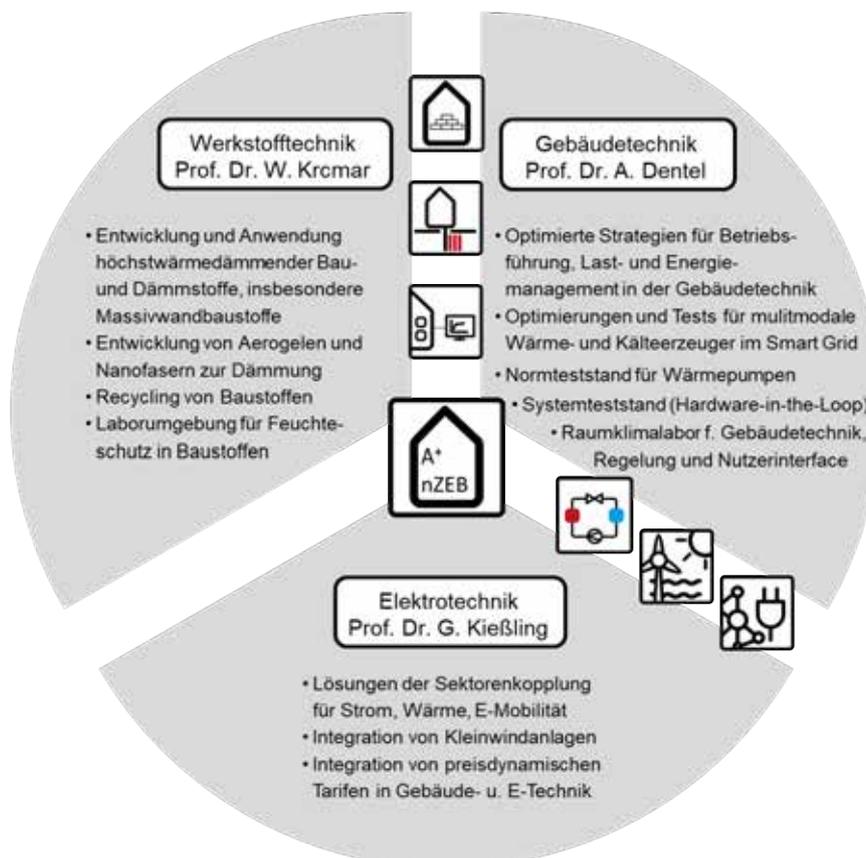


Abbildung 1.42: Strategische Weiterentwicklung der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“.

Aus der Darstellung geht die künftige Struktur der Arbeitsgruppe mit den fachlichen Schwerpunkten „Werkstofftechnik“, „Gebäudetechnik“ und „Elektrotechnik“ 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. Während sich die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar um die „Werkstofftechnik“ im Allgemeinen und um hochwärmedämmende Baustoffe im Speziellen kümmert, bringt die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dentel die für das Themengebiet „Gebäudetechnik“ benötigten Kompetenzen ein, die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Kießling deckt die Arbeitsgebiete „Elektrotechnik“ in Gebäuden ab. Alle drei 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, wie in den Förderprogrammen der Europäischen Kommission (H2020 und Nachfolgeprogramme) sowie dem 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung verstärkt bearbeitet werden.

Die Förderung dieser Akteure durch den EnCN hat trotz des finanziell begrenzten Umfangs einen wesentlichen positiven Einfluss auf die fachliche Kompetenz, die Handlungsfähigkeit und den Drittmittel-Akquiseumfang der Arbeitsgruppe. Dies resultiert aus einer gewissen Grundfinanzierung, der geschaffenen interdisziplinären und kollegialen Infrastruktur und nicht zuletzt aus dem ideellen Überbau durch den EnCN als Institution. Die Grundförderung des EnCN ermöglicht die Generierung eines Vielfachen an Finanzmitteln durch Drittmittelprojekte.

Nachfolgend ein Ausschnitt aus den aktuellen Planungen für neue (Kooperations-)Projekte:

- ZIM Kooperationsprojekt mit Fa. Preform GmbH und Fa. B.A.M (Bio-Composites And More GmbH) zur Produktentwicklung. Begleitung der Baustoffentwicklung, Optimierung der Produktion, energetische/stoffliche Studien. Antrag 2020-09.
- EU Projekt RESEALL - Renewable Energy Systems in Environmentally Activated Living Labs (call: LC-GD-4-1-2020, Programm Green Deal). Formulierung des Antrags Ende 2020, Einreichung 26.01.2021.
- Weitere zwei EU Projekte wurden vorbereitet. Davon wurde ein Antrag eingereicht, jedoch nicht bewilligt. Ein Antrag wurde nach Abstimmungen zwischen den Partnern zum vorgesehenen Call und -Termin (2020-09) nicht ausformuliert, eine Kooperation in diesem Themenbereich und Beantragung bei zukünftigen Gelegenheiten (geeigneten EU Calls) wird angestrebt.
- Nach Abschluss des Projekts Smart Energy Bench (2020-12) soll der erweiterte Anlagenprüfstand intensiv für die Akquise von Mess- und Forschungsaufträgen sowie Kooperationsprojekten genutzt werden. Hierzu laufen konkrete Abstimmungen mit der FAU, Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) sowie einer ausgegründeten Entwicklungsfirma, im Kontext der Entwicklung eines Wasserstoff-Brenners und Wärmepumpen.
- Vorgespräche im Rahmen vom Förderformat ZIM IraSME. Projektvorschlag mit den EnCN Arbeitsgruppen Werkstofftechnik und Gebäudetechnik, mit kanadischem Hersteller von Biomasse basierten Baustoffen und Bausystemen. Begleitung der Baustoffentwicklung sowie der energieeffizienten Produktion in neuen, deutschen sowie europäischen Produktionsstätten. Demogebäude/ Reallabor/ Werkstoff spezifische bauphysikalische Untersuchung/ ganzheitliche Bilanzierung von Biomasse, Produktion, Transport, Betrieb, Recycling / Konzepte für Energie- und Gebäudetechnik.
- Vorgespräche im Rahmen einer Kooperationsveranstaltung „Wallonia meets Energy Campus Nürnberg“ 08.-10.12.2019 in Belgien, Brüssel. Insbes. Halió International SA/ AGC Glass Europe SA (verglasungsintegrierter Sonnenschutz; Bauphysikalische/energetische Studien, prädiktive Anlagenregelung), Honeywell Deutschland/international (Entwicklung und Demonstration modellprädiktiver Anlagenregelungen).
- Vorgespräche mit dem Institut für Umweltenergie (IfU). Demogebäude / Reallabor / Energie- und Anlagekonzept mit Bodenplattenaktivierung/ Entwicklung und Optimierung der Regelung.

2 Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasen- maschinen; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Andreas Kremser, M.Sc. Richard Steckel, M.Sc. Martin Regnet, M.Eng. Dennis Jagosz, M.Sc. Lukas Rabenstein, M.Sc. Kritika Deepak, M.Sc. Christian Köbler, B.Eng. Jonas Bruckschlögel

Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, sind Alternativen in der Energieerzeugung notwendig, wie auch eine erhöhte Energieeffizienz der elektronischen Geräte und Maschinen. Besonders im Industriesektor, welcher 44 % des gesamten Energieverbrauches in Deutschland ausmacht, ist eine Effizienzsteigerung zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende essentiell. Im Jahr 2016 wurde in der deutschen Industrie insgesamt 225 TWh elektrische Energie umgesetzt. Hierbei beansprucht die Prozesswärme knapp 20 % und die Umwandlung in mechanische Energie zwei Drittel. Zusätzlich sind rund ein Drittel der verbauten elektrischen Antriebe in der Industrie modernisierungsbedürftig. Eine Verbesserung der Energieeffizienz der Maschinen ist demnach die wirkungsvollste Maßnahme zur Steigerung der Effizienz der industriellen Energienutzung. Neben Maschinen für Netzbetrieb werden bei etwa 30 % der neu installierten Antriebe Maschinen für Umrichterbetrieb eingesetzt. Als Industrieantriebe werden überwiegend Asynchronmaschinen verwendet, wobei sich der Leistungsbereich der Niederspannungsmotoren, die am Spannungszwischenkreisumrichter betrieben werden, in den letzten Jahren deutlich ausgeweitet hat (bis in den MW- Bereich). Selbst im Leistungsbereich bei 1 MW sind Niederspannungsmotoren mit Runddrahtwicklung deutlich günstiger in der Herstellung, als Hochspannungsmotoren gleicher Leistung mit Flachdrahtwicklung. Dies gilt in viel stärkerem Ausmaß für die Kosten von Niederspannungs- und Mittelspannungsumrichtern.

Antriebe mit Niederspannungsmaschinen im höheren Leistungsbereich werden zum Teil aufgrund der hohen Leistungen und Ströme mit mehreren parallelgeschalteten Frequenzumrichtern realisiert; nach dem derzeitigen „Stand der Technik“ jedoch ohne Phasenversatz. Durch Anpassen der Ansteuerung der Umrichter und Modifikation der Wicklung kann eine dreisträngige Maschine auch mehrsträngig ausgeführt werden. Eine einfachere Wicklungsauslegung, besseres Betriebsverhalten, geringere Verluste und somit eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz können erreicht werden. Als Ergebnis dieses EnCN-Forschungsprojektes stehen allgemeingültige Berechnungsansätze für mehrsträngige Induktionsmaschinen sowie geeignete Ansteuerkonzepte und -verfahren von Standardindustriemrichtern zur Verfügung, mit denen mehrphasige Induktionsantriebe methodisch ausgelegt und optimiert werden können.

2.1 Arbeiten und Ergebnisse

Der Entwurf der Statorwicklung ist eine zentrale Aufgabe bei der Auslegung elektrischer rotierender Maschinen. Jeder Wicklungsentwurf hat grundsätzlich zum Ziel, den Wicklungsfaktor der Arbeitswelle zu maximieren. Der Wicklungsfaktor erscheint im Ausdruck für die Hauptinduktivität von Induktionsmaschinen, bei der ein hoher Wert dazu beiträgt, den Magnetisierungsstrom zu minimieren und den Leistungsfaktor zu erhöhen. Er spielt eine ebenso wichtige Rolle bei Synchronmaschinen aller Art. Zusätzlich zur Arbeitswelle ist die Analyse der resultierenden Oberwellen unerlässlich und vor allem für die Verlustbetrachtung von entscheidender Bedeutung. In vielen praktischen Fällen erfolgt die Auslegung mit heuristischen oder (semi-)graphischen Ansätzen, wobei bisher keine einheitliche Auslegungsmethodik für symmetrische Ganzloch- und Bruchlochwicklungen mit mehreren Sub-Wicklungssystemen verfügbar ist.

Im Förderjahr 2019 wurde aus diesem Grund ein algebraischer Wicklungsentwurf für Maschinen mit Strangzahlen $m_1 = k \cdot a$ entwickelt. Dabei ist k die Anzahl der Sub-Wicklungssysteme und a die Anzahl der Sub-Stränge (mit der Bedingung a ungerade). Die Systematik ist gültig für symmetrische Ganzloch- und Bruchlochwicklungen, einschließlich geometrisch konzentrierter Wicklungen (Zahnspule), so dass die Synthesaufgabe für beide Wicklungsarten vereinheitlicht und somit der Großteil der technisch relevanten Wicklungskonfigurationen abdeckt wird. Darüber hinaus

maximiert sie den Wicklungsfaktor der Arbeitsharmonischen und erzeugt einen eindeutigen Wicklungsentwurf. Somit kann eine Vielzahl an Wicklungsvarianten mit beliebiger Strangzahl in kürzester Zeit entworfen werden. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft eine Wicklungskonfiguration mit einer Strangzahl von $m_1 = 2 \cdot 7$ als Zweischicht-Bruchlochwicklung (Zahnspule) mit einer Nutzahl von $N_1 = 84$ und einer Polzahl von $2p = 90$, um die erhebliche Leistungsfähigkeit des Ansatzes zu verdeutlichen.

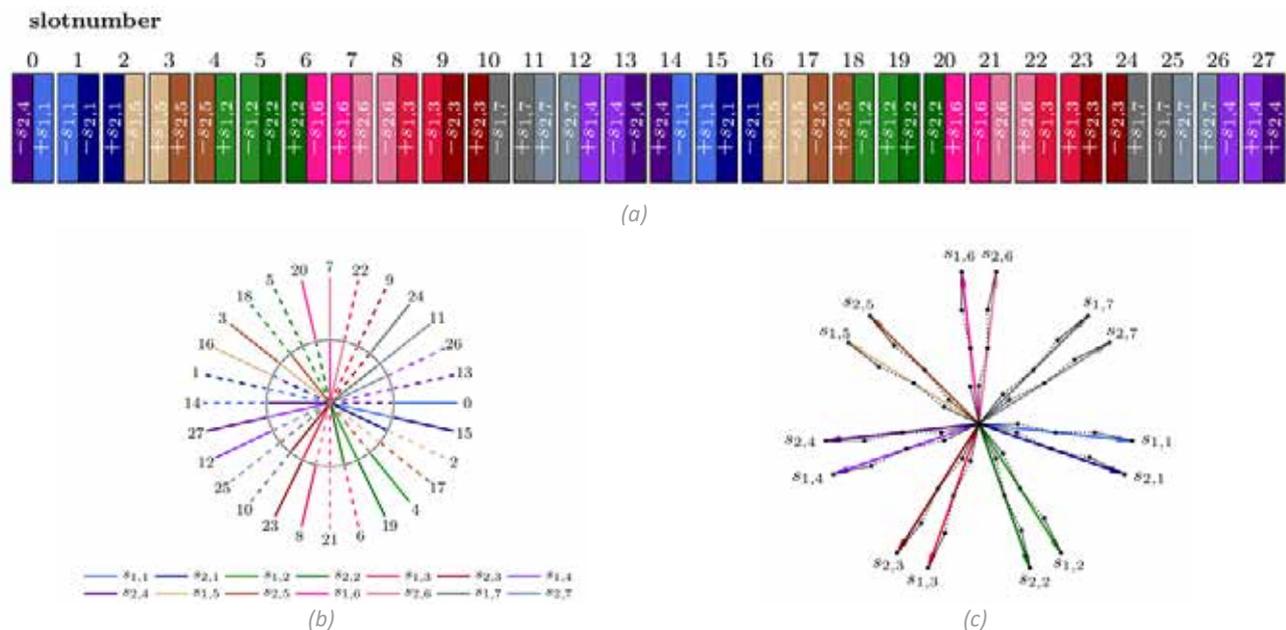


Abbildung 2.1: Wicklungskonfiguration $N_1 = 84$, $2p = 90$, $m_1 = 2 \cdot 7$, $q = 1/15$: (a) Nutbelegungsplan der Urwicklung, (b) Nutspannungstern der Urwicklung, (c) Strangspannungstern der Urwicklung.

Ein weiterer Vorteil der algebraischen Entwurfsmethodik ist die Herstellung der analytischen Einsicht – nämlich der klaren Interpretation der funktionalen Abhängigkeit der Wicklungseigenschaften von den Wicklungsparametern, wie beispielsweise der Wicklungsfaktoren. Auf Basis der Methodik wurde eine generelle Analysesystematik entwickelt, die neben der Synthesaufgabe des Wicklungsentwurfes auch die Symmetrischen Komponenten der Spannungs- bzw. Stromsysteme und die trigonometrische Interpolation der Nutdurchflutungen zur Bestimmung der jeweiligen Oberwellen umfasst. Damit gelingt die Überprüfung der üblichen Nut-/Polpaarzahl Kombinationen der Statorblechpakete im industriellen Umfeld hinsichtlich der Ausführbarkeit mit symmetrischer, mehrsträngiger Wicklung, sowie eine erste qualitative Bewertung des Potentials der Energieeffizienzsteigerung. Dies ermöglicht zeitsparende Analysen großer Datensätze, z.B. zur Potentialeinschätzung ganzer Baureihen. Außerdem liefert die Analysesystematik neue Erkenntnisse zur Berechnung und Interpretation der spezifischen Oberfelderscheinungen bei mehrsträngiger Wicklungsausführung und komplettiert die bereits entwickelten Berechnungsansätze für das Grund- und Oberfeldverhalten der Maschine. Die Modelle zur Bestimmung der Oberschwingungsströme durch Umrichterspeisung konnten dadurch deutlich optimiert werden. Die messtechnischen Verifikationen an den beiden Versuchsmaschinen zeigen, dass die Vorausberechnung der zusätzlichen Stromwärmeverluste in der Auslegungsphase in guter Näherung gelingt.

Als weiteres Ergebnis steht ein Berechnungsprogramm auf Basis von MathWorks Matlab/Simulink zur Verfügung, in dem die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Auslegungs- und Berechnungsmodelle implementiert wurden. So sollen die erarbeiteten Ergebnisse nachhaltig für weitere Forschungsvorhaben verfügbar gemacht und der Wissenstransfer in die Industrie erleichtert werden. In die Software wurden zusätzlich Schnittstellen zu kommerziellen Programmen (ANSYS Maxwell) für Finite-Elemente Simulationen und Optimierungen integriert. Vordefinierte Subroutinen ermöglichen eine vollautomatisierte Modellerstellung und Analysen von Teilproblemen in Verbindung mit mehrsträngigen Maschinen. Neben der Induktionsmaschine wurde begonnen, die permanenterregte Synchronmaschine als weitere Maschinentopologie aufzunehmen, um die Technologie der Mehrsträngigkeit einem größeren Anwendungsbereich zu eröffnen. Eine schematische Darstellung des Berechnungsprogramms ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

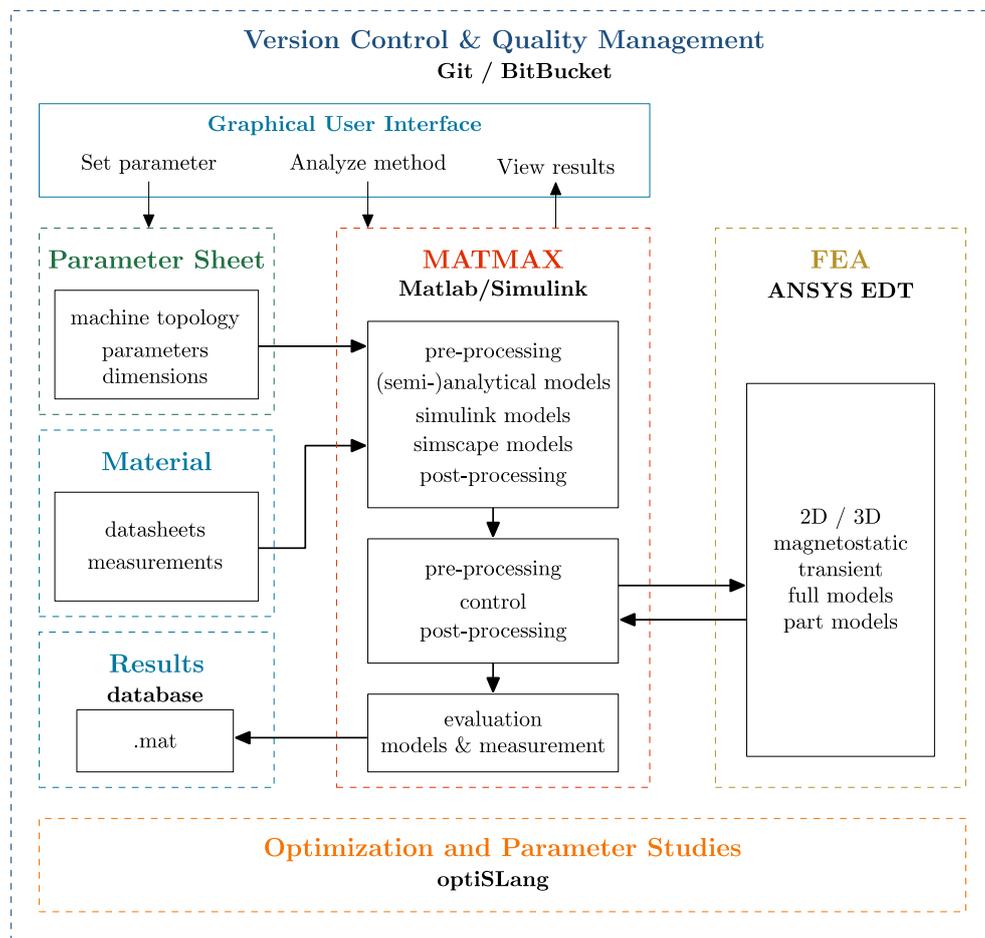
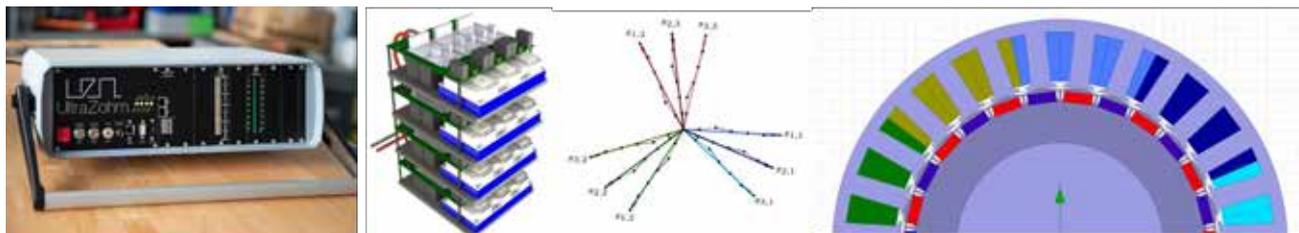


Abbildung 2.2: Schema Berechnungsprogramm zur Auslegung elektrischer Maschinen mit mehrsträngiger Wicklung.

Zusammenfassend kann von einer erfolgreichen Bearbeitung der im Projektantrag geplanten Arbeitspakete berichtet werden. Die bisherigen Erkenntnisse sind Grundlage für die Initialisierung weiterer Forschungsprojekte.

2.2 Kooperation im EnCN

Innerhalb des EnCN ist der Themenbereich der Mehrphasenmaschine sehr eng mit dem Teilprojekt 3 vernetzt. Hierbei soll die Mehrphasenmaschine mit der modellprädiktiven Regelung (MPC) als Ansteuerverfahren betrieben werden. Zu Erprobungszwecken entsteht zurzeit ein innovativer, drehzahlvariabler Antriebsstrang. Die Basis bilden mehrere Varianten einer 9-strängigen permanenterregten Synchronmaschine, die sich hinsichtlich der gewählten Rotortopologie unterscheiden. Weiterhin können deren Statorspulen in die beiden Wicklungskonfiguration $m_1 = 1 \cdot 9$ und $m_1 = 3 \cdot 3$ verschaltet werden. Die Auslegung erfolgte mit dem im Forschungsvorhaben entwickelten Modellen und in Kooperation mit der TU München (TUM). Die Energieversorgung erfolgt über einen eigens entwickelten, modularen Spannungszwischenkreisrichter mit der Möglichkeit verschiedene Zwischenkreisverschaltungen zu realisieren. Außerdem können neben der konventionellen IGBT Technologie, auch zukunftssträngige Leistungshalbleitertechnologien, wie SiC und GaN in die Untersuchung einbezogen werden. Der Antrieb wird durch eine innovative, hochperformante Berechnungsplattform (UltraZohm) komplettiert, sodass neben konventionellen Ansteuerkonzepten (FOC, DTC), auch rechenintensive Regelungsalgorithmen (MPC) realisiert werden können. In der Gesamtheit stehen damit eine Vielzahl von Antriebsvarianten zu Verfügung, um die theoretischen Erkenntnisse zu den verbesserten Antriebseigenschaften zu validieren.



Berechnungsplattform zur Ansteuerung modularer Umrichter permanentterregte Synchronmaschine mit $N_1 = 27$, $p = 13$, $m_1 = 3 \cdot 3$, $q = \frac{3}{26}$

Abbildung 2.3: Komponenten des Antriebsstrangs zur Erprobung innovativer Antriebs- und Regelungskonzepte für mehrsträngige Maschinen.

2.3 Kooperation mit der Industrie

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2020 im Rahmen des EnCN weitere Kooperationen auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik, insbesondere im Bereich Steigerung der Energieeffizienz entstanden. Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie sind:



Abbildung 2.4: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft.



Abbildung 2.5: Modellanlage des Kleinstwasserkraftwerks im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Forschungsprojekt BlauPower).

Das Forschungsprojekt BlauPower hatte die Entwicklung eines hocheffizienten und kostengünstigen Klein(st)wasserkraftwerks zum Ziel. Der Fokus des Projektes war unter anderem die Entwicklung eines hocheffizienten Generators in transversaler Bauweise. Die Transversalflussmaschine als Generator in Verbindung mit einer Modellanlage eines Kleinstwasserkraftwerks konnte erfolgreich am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH-Nürnberg aufgebaut werden. Durch den drehzahlvariablen Betrieb konnte das Wasserrad der Modellanlage in seinem optimalen

Betriebspunkt betrieben und dadurch die Effizienz gesteigert werden. Das Forschungsprojekt wurde in Kooperation mit der FGB: Entwicklung + Konstruktion GmbH durchgeführt und endete nach dreijähriger Laufzeit im November 2020.

In Kooperation mit den Industrieunternehmen Siemens AG, Thyssen Krupp AG und der Gebr. Waasner GmbH wurde ein Projekt zum Einfluss der Fertigung auf das Betriebsverhalten wechselstromgespeister Elektromotoren abgeschlossen. Schwerpunkte innerhalb des Projekts waren die analytische Vorausberechnung der Erhöhung von Eisenverlusten und des Magnetisierungsbedarfs aufgrund einzelner Fertigungsschritte der Statorblechpakete. Hierzu wurden Schnittkanteneinflüsse inklusive des Verschleißes von Stanzwerkzeugen, als auch Druck-Zug-Spannungen innerhalb des eingesetzten Werkstoffes Elektroblech untersucht. Die Ergebnisse wurden in Berechnungsmodelle überführt und durch Finite-Elemente Simulationen und der Auswertung einer großen Anzahl an Testmaschinen validiert.

Seit März 2017 läuft eine kooperative Promotion an der TU München mit dem Titel: Energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen. Betreuender Professor seitens der TU München ist Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog, Professur für Energiewandlungstechnik. EnCN-Mitarbeiter und Promovend ist Herr Richard Steckel (M.Sc.).

Seit April 2020 läuft eine Promotion in Kooperation mit der Universität Stuttgart mit dem Titel: Entwurf und Optimierung einer Transversalflossmaschine. Die Promotion wird dort von Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour am Institut für elektrische Energiewandlung betreut. Promovend ist der EnCN-Mitarbeiter Herr Lukas Rabenstein (M.Sc.).

Weitere Promotionsvorhaben sind bereits geplant und starten voraussichtlich im nächsten Förderjahr.

2.4 Personal

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerkonzepte waren zwei wissenschaftliche Mitarbeiter, zwei Masteranden des Studienganges „Master of Applied Research“ und eine Teamassistentin (halbe Stelle) tätig. Die Mitarbeiter haben hierbei die Förderung im genannten Themenfeld genutzt um neben der wissenschaftlichen Tätigkeit zusätzliche industrienaher Forschungsk Kooperationen anzustoßen. Wie in Abschnitt „Kooperationen“ genannt, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungsprojekte sowie Industrieprojekte entstanden.

2.5 Ausblick

Bei drehzahlvariablem Betrieb mehrsträngiger Maschinen mit Spannungszwischenkreisumrichtern sind es die zusätzlichen Oberschwingungsverluste durch die pulsweitenmodellerte Ausgangsspannung, die den sonst positiven Effekten der Strangzahlerhöhung, hinsichtlich der Energieeffizienz entgegenwirken. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen in diesem Bereich ausgeweitet. Die Oberschwingungsmodelle zur Bestimmung der umrichterbedingten Zusatzverluste werden weiter optimiert, um auch den Verlustanteil der Eisenverluste in die Vorausberechnung in der Auslegungsphase einbeziehen zu können. Des Weiteren werden neue Auslegungskriterien für mehrphasige Induktionsantriebe erarbeitet bzw. die bestehenden Kriterien auf Eignung überprüft. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Auslegung verschiedener Maschinenkonfiguration im höheren Leistungsbereich ab Baugröße 355 und der Vorausberechnung der Steigerungspotentiale hinsichtlich der Energieeffizienz.

3 Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme;

Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz,

M.Sc. Sebastian Wendel, M.Sc. Tobias Schindler, M.Sc.

Michael Hoerner, M.Sc. Michael Gerstner, B.Eng. Thilo Wendt,

B.Eng. Barnabas Haucke-Korber und B.Eng. Philipp Gebhardt

Die Energieeffizienz ist nach wie vor eines der wichtigsten Themenfelder in der Antriebstechnik im Hinblick auf Forschungsbedarf und wirtschaftliche Bedeutung. Durch die zunehmende Elektrifizierung von Antriebssträngen entsteht ein Hebel, der selbst bei kleinen Wirkungsgradsteigerungen großen Einfluss auf das Effizienzprofil betreffender Wirtschaftszweige hat und somit einen Beitrag zur Energiewende leisten kann. Neben dem Trend der letzten Jahre, „Industrie 4.0“, bei welchem durch Verfügbarkeit präziser Prozessdaten die Prozess- und Anlagenführung effizienter gestaltet werden kann, stellen auch Regel- und Ansteuerkonzepte des Antriebsstrangs selbst ein großes Optimierungspotential dar. Aktuelle Trends auf diesen Gebieten sind modellbasierte Regelungsverfahren sowie neuerdings auch künstlich intelligente Verfahren (KI).

Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Effizienzsteigerung des elektrischen Antriebsstranges durch Ansteuer- und Regelungskonzepte. Ziel ist es, neue Regelungsalgorithmen zu erforschen und zu entwickeln, die die üblichen regelungstechnischen Anforderungen an Dynamik und Störverhalten erfüllen und darüber hinaus schon direkt im Regelungsalgorithmus die Energieeffizienz berücksichtigen und optimieren. Als Grundlage für diese neuen Verfahren wird das sogenannte modellbasierte prädiktive Regelungsverfahren (MPC) gesehen, das im geplanten Forschungsvorhaben um Verlustmodelle der Komponenten des Antriebsstrangs erweitert wird sowie moderne Halbleitertechnologien wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) nutzt. Ein weiteres Ziel ist die Implementierung dieser neuen Regelungsverfahren in Demonstratoren bei Industriepartnern, um aufzuzeigen, welche Potenziale die beschriebenen Antriebsmodelle, Verlustmodelle und Optimierungsziele durch die Umsetzung in industriellen Antriebsaufgaben aufweisen.

3.1 Arbeiten und Ergebnisse

Im Förderjahr 2020 wurden experimentelle Verifikationen der im Rahmen des EnCN erarbeiteten MPC-Algorithmen in Anwendungen von Industriepartnern durchgeführt. Beispielhaft wird die Implementierung in der Ansteuerung eines Linearschwingförderers beim Industriepartner Afag herausgegriffen. Im Rahmen zweier Masterarbeiten wurden die elektrischen und mechanischen Systeme eines Wendel- und eines Linearschwingförderers (Abbildung 3.1) modelliert und für eine Echtzeitregelung nutzbar gemacht. Das MPC-Verfahren regelt dabei die Beschleunigung, welche das zu fördernde Gut auf dem Schwingförderer bewegt. Das Regelverfahren wurde zunächst simulativ untersucht und einem gesteuerten Verfahren nach dem Stand der Technik gegenübergestellt. Abbildung 3.2 zeigt das deutlich raschere Ein- und Ausschwingen des Linearschwingförderers im geregelten Betrieb. Die für die Förderbewegung eingesetzte Energie wird sehr viel zielgerichteter eingesetzt, was neben der Effizienz auch eine präzisere Kontrolle der Fördermenge erlaubt.



Abbildung 3.1: Linearschwingfördersystem der Firma Afag.

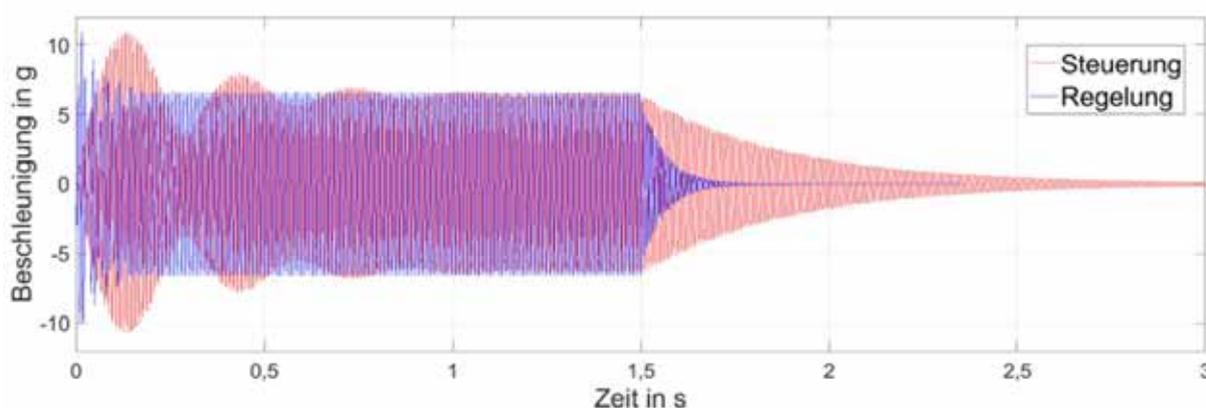


Abbildung 3.2: Vergleich - Beschleunigungsvorgabe für eine Steuerung und Regelung mit Vergleich des Ein- und Ausschwingverhaltens am Beispiel eines Linearschwingförderers.

Praktisch gesprochen eröffnet MPC hier die Möglichkeit, ein Fördergut (z.B. Schrauben) stückzahlgenau einem Prozess zuzuführen. Die Effizienz des Verfahrens wurde messtechnisch durch Bestimmung des Leistungsfaktors (engl. power factor, PF) bestimmt und mit zwei kommerziellen Lösungen von Mitbewerbern verglichen. Bei diesen wird die Beschleunigung nicht geregelt, sondern die Schwingung durch eine simple Phasenanschnittsteuerung realisiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Verifikation. Das Implementierte Verfahren zeigt in allen betrachteten Betriebspunkten einen durchweg hohen Leistungsfaktor und damit eine hohe Effizienz. Die beiden Produkte von Mitbewerbern schneiden durch die einfache Steuerung deutlich schlechter ab.

Tabelle 6: Leistungsfaktor für verschiedene Ansteuerungen am Beispiel eines Linearschwingförderers.

Beschleunigung (g)	Freq. (Hz)	P (VA)	Q (VA)	S (VA)	PF
AFAG-Board					
5,0	100	4,70	3,38	5,79	0,81
9,5	100	7,39	8,10	10,96	0,67
5,0	102	5,57	5,18	7,76	0,73
6,4	102	7,09	8,27	10,90	0,65
5,0	95	4,13	3,57	5,46	0,76
10,0	95	4,97	3,75	6,23	0,80
—	—	—	—	—	Ø 0,74
Mitbewerber 1					
—	—	—	—	—	Ø 0,15-0,18
Mitbewerber 2					
—	—	—	—	—	Ø 0,41-0,60

Das Beispiel des Linearschwingförderers zeigt, dass durch die Anwendung moderner Ansteuer- und Regelverfahren ein großes Optimierungspotential in Bezug auf die Energieeffizienz von leistungselektronischen Systemen direkt auf Applikationsebene ausgeschöpft werden kann. Im konkreten Fall wird neben der Effizienz auch die Güte der Prozessführung gesteigert, was evtl. höhere Kosten einer MPC-geregelten Lösung aufwiegen kann. Neben den Aktivitäten zur experimentellen Verifikation wurde verstärkt damit begonnen den MPC-Regelansatz auf mehrsträngige elektrische Antriebe zu erweitern. Durch Ansätze mit einfachen Modellen konnten in Simulation bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Regelung permanenterregter Synchronmaschinen in sechs- und neunsträngiger Ausführung (vgl. Teilprojekt 2) im Nennbetrieb. Später soll auch der Betrieb im Fehlerfall, bspw. bei Ausfall eines Maschinenstrangs, untersucht werden. Im Rahmen dieses Themenfeldes wurde zudem ein kooperatives Promotionsprojekt mit der TU München am Lehrstuhl für elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik (Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel) begonnen. Zur Erprobung der innovativen Regelverfahren und insbesondere zur Erforschung mehrsträngiger Antriebssysteme wird angepasste Leistungselektronik benötigt. Aus diesem Grund befindet sich ein modulares Konzept eines Frequenzumrichters in Entwicklung. Das System basiert auf Siliziumkarbid-Leistungsmodulen und ist auf beliebige Phasenzahlen erweiterbar. Der Einsatz der verlustarmen und schnellschaltenden Wide-Bandgap Halbleitertechnologie erlaubt eine besonders kompakte Bauweise und Kühlung des Systems. Pro dreiphasiger Subeinheit, dargestellt in Abbildung 3.3, ist eine Leistung von 80 kVA geplant. Durch die Auslegung der Zwischenkreisspannung auf 800 V kann das System zudem zur Erforschung moderner Antriebskonzepte im Automotive-Bereich verwendet werden.

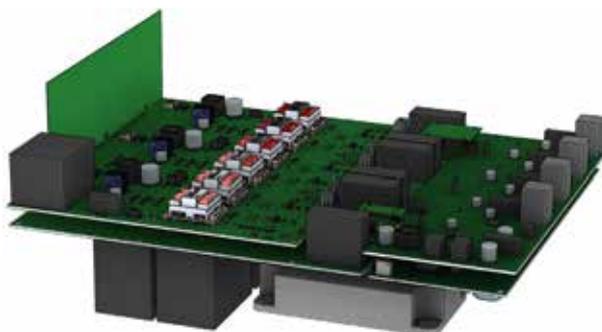


Abbildung 3.3: Dreiphasige Subeinheit des modularen Umrichters.

3.2 Kooperation

Im Themenbereich des Teilprojekts 3 werden am EnCN diverse Forschungsprojekte in Kooperation mit Partnern aus der Industrie und Wissenschaft bearbeitet. Allen liegt das Bestreben zugrunde durch intelligente Verfahren und Regelungen sowie dem Einsatz modernster Technik Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in Bereichen der leistungselektronischen Energiewandlung und Erzeugung zu erforschen. Durch die enge Kooperation mit Partnern aus der Industrie steht bei allen Fördervorhaben neben den wissenschaftlichen Zielen stets auch die spätere praktische Nutzbarkeit der Ergebnisse im Vordergrund.

Fördervorhaben KI-POWER

Die genannten Ansteuerverfahren benötigen leistungsfähige Berechnungsplattformen für die industrielle Umsetzung. Aus diesem Grund ist im Kontext des EnCN das vom BMBF geförderte Verbundprojekt „KI-Power“ entstanden. Im Rahmen des Forschungsprojekts KI-Power - System für die flexible Erprobung von modellbasierten prädiktiven und künstlich intelligenten Regelungsverfahren in der elektrischen Antriebstechnik - soll eine innovative, flexible, modulare und hochperformante heterogene Plattform für neuartige Ansteuer- und Regelungskonzepte im Bereich von leistungselektronischen Systemen erforscht werden. Hierbei stehen Echtzeitfähigkeit, ein breites Anwendungsspektrum sowie hohe Rechenleistung im Vordergrund.



Abbildung 3.4: UltraZohm Echtzeit Berechnungsplattform.

KI-Power bietet eine bisher nicht existente, ganzheitliche Betrachtung vertrauenswürdiger, mikroelektronischer Hardware- und Softwarekomponenten als Bestandteil einer innovativen Plattform. Im Bereich der Hardware zeichnet sich diese durch minimierte Latenz, minimierten Jitter, optimierte Signalintegrität und enorme Rechenleistung aus. Diese Rechenleistung ergibt sich durch die heterogene Berechnung der Algorithmen mit einer sowohl in Kosten und Rechenleistung skalierbaren SoC-FPGA Prozessorfamilie. Im Bereich der Software wird ein modulares Framework für die Plattform erforscht, wobei ein transparenter Workflow für die Software und Hardwareentwicklung mit einer Nutzung von Open Source Tools (u. a. PYNQ, Python) sowie automatisierter Code-Generierung genutzt werden soll. Die in KI-Power entwickelte Plattform UltraZohm wird unter einer Open Source Lizenz zur Verfügung gestellt. Bei dem für das Projekt gebildeten Forschungsverbund wurde Wert daraufgelegt, sowohl Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen zu etablieren als auch Industriepartner entlang der gesamten Wertschöpfungskette einzubinden.



Abbildung 3.5: KI-Power Forschungsverbund mit Industriebeteiligung über die gesamte Wertschöpfungskette.

Fördervorhaben KIRA

Im Zuge des zunehmenden Einsatzes von künstlicher Intelligenz in der Ansteuerung leistungselektronischer Systeme ist im Rahmen des EnCN das Projekt KIRA initiiert worden. Ziel des Vorhabens „KIRA“ ist die Reduzierung der Schwingungsbelastung von elektrischen Antrieben sowie die Vereinfachung der Reglereinstellung von Antriebssystemen. Hierzu soll ein künstlich intelligentes Regelverfahren (KI) eingesetzt werden, das Methoden des Reinforcement Learnings nutzt. Im Rahmen des Projekts soll das Funktionsprinzip und die Vorteile der KI-Regelung validiert werden. Hierfür wird ein Proof-of-Concept des Verfahrens erbracht und dessen Vorteile gegenüber dem Stand der Technik quantifiziert. Für die KI-Regelung soll ein IP-Core entstehen, der in gängige Frequenzumrichter integriert werden kann und somit eine beschleunigte Markteinführung des Verfahrens ermöglicht. Im Projekt werden Kombination von maschinellem Lernen und modellprädiktiver Regelung untersucht.

Fördervorhaben NETPVStore

Der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen und die angestrebte Dezentralisierung der Energieerzeugung stellt das Stromnetz der Zukunft vor große Herausforderungen. Die fluktuierende Natur von Sonnen- und Windenergie sowie der Wegfall der Momentanreserve und Primärregelleistung durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke machen innovative Lösungen notwendig, um die Stabilität des modernen Stromnetzes zu sichern. In diesem Sinne startete am 01.12.2020 das vom BMWi geförderte Projekt „NETPVStore“ mit den Kooperationspartnern ZAE Bayern, Sunset Energietechnik, Skeleton Technologies und DHG Engineering. Ziel des Projekts ist die Erforschung und praktische Erprobung eines netzdienlichen Photovoltaik-Speicher-Systems aus kommerziell verfügbaren Photovoltaikmodulen und darauf angepasstem ultraschnellen elektrischen Kurzzeitspeicher aus Superkondensatoren. Superkondensatoren in Form von Doppelschichtkondensatoren (electric double-layer capacitors, EDLC) zeichnen sich durch die rein elektrostatische Energiespeicherung aus. Im Gegensatz zu herkömmlichen Batteriespeichern kommt es dabei zu keiner signifikanten chemischen Alterung. Zudem weisen Ultrakondensatoren eine deutlich höhere Leistungsdichte auf als Batterien. Dadurch sind sie für die Zwischenspeicherung von Energie aus Leistungsfluktuationen im Sekunden- bis Minutenbereich aufgrund von über das Solarfeld ziehenden Wolken besonders geeignet. Im Projekt sollen intelligente Verfahren zur Anbindung der Kurzzeitspeicher erarbeitet werden um durch die Glättung von naturbedingten Fluktuationen zum einen die wirtschaftlichere Systemauslegung der Photovoltaikanlage als auch ein netzfreundlicheres Betriebsverhalten zu erreichen. Zudem soll die technische Möglichkeit untersucht werden, die Speicherenergie durch den Einsatz geeigneter Regelverfahren als Primärregelleistung zur Stabilisierung des Netzes einzusetzen.

3.3 Kooperation mit der Industrie

Die Kooperationen mit Industriepartnern aus den Vorjahren konnte gefestigt und weiter vertieft werden. Sowohl durch direkte Beteiligung und neuen Fördervorhaben als auch durch direkte Beauftragung von Entwicklungs- und Messaufträgen bestehen enge Bindungen zu unseren Partnern.



Abbildung 3.6: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft (Auszug).

3.4 Personal

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerkonzepte sind aktuell vier wissenschaftliche Mitarbeiter, zwei Studenten des Masterstudiengangs „Applied Research in Engineering Sciences“, eine Teamassistentin (halbe Stelle) sowie zahlreiche weitere Bacheloranden und Masteranden tätig. Die Mitarbeiter haben hierbei die Förderung im genannten Themenfeld genutzt, um neben der wissenschaftlichen Tätigkeit, zusätzliche industriennahe Forschungsk Kooperationen anzustoßen. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungs- sowie Industrieprojekte entstanden.

3.5 Ausblick

Im Jahr 2021 erfolgt die Vertiefung in das Themenfeld der mehrsträngigen elektrischen Antriebssysteme in Verbindung mit moderner modularer Leistungselektronik und geeigneten Ansteuerkonzepten. Hierzu werden sowohl in Simulation neuartige Algorithmen erprobt als auch konkrete Prototypen aufgebaut und in Betrieb genommen.

3.6 Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchts

Seit Juni 2019 läuft eine kooperative Promotion an der TU München mit dem Titel: Modellprädiktive Regelung mehrsträngiger permanenterregter Synchronmaschinen. Betreuender Professor seitens der TU München ist Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Professur für Elektrische Antriebssysteme und Leitungselektronik. EnCN-Mitarbeiter und Promovend ist Herr Michael Hoerner (M.Sc.).

Seit Dezember 2020 läuft eine kooperative Promotion an der TU München mit dem Titel: Reinforcement Learning für die Stromregelung permanenterregter Synchronmaschinen. Betreuender Professor seitens der TU München ist Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Professur für Elektrische Antriebssysteme und Leitungselektronik. EnCN-Mitarbeiter und Promovend ist Herr Tobias Schindler (M.Sc.).

Weitere Promotionsvorhaben sind bereits geplant und starten voraussichtlich im Jahr 2021.

3.7 Technologietransfer

Aus dem Teilprojekt Effizienz, dem Verbundprojekt KI-Power sowie Kooperationen über den EnCN hinaus konnte im November 2020 die Zohm Control GmbH erfolgreich gegründet werden. Die Ausgründung, bestehend aus Wissenschaftlern der TH Nürnberg sowie TU München, industrialisiert innovative Regelverfahren und hat sich zum Ziel gesetzt auch anderen Wissenschaftlern die Nutzung der UltraZohm Plattform zu ermöglichen. Aufgrund der komplexen Fertigung der Open Source Komponenten ist hierfür ein geeigneter Vertriebsweg nötig, da eine Einzelstückfertigung von einzelnen Wissenschaftlern für diese nicht wirtschaftlich ist.



Abbildung 3.7: Gründerteam der Zohm Control GmbH.



Abbildung 3.8: Firmenlogo.

Das UltraZohm ist der entscheidende Enabler für die Forschung an neuartigen Ansteuerkonzepten und ermöglicht die beschleunigte Markteinführung innovativer Verfahren. Diese intelligente Steuer- und Regelung ist hierbei für qualitativ hochwertige Produkte zunehmend ein Unterscheidungskriterium gegenüber niedrigpreisiger Konkurrenz. Für Wissenschaftler steht die unkomplizierte Implementierung eigener Verfahren im Vordergrund, wodurch Laboraufbauten vereinfacht werden. Im Gegensatz zu kommerziell verfügbaren Systemen bietet das UltraZohm eine sehr hohe Rechenleistung und verzichtet vollständig auf geschlossene Systeme („Black-Box“). Letzteres ist für die Forschung von hoher Bedeutung, da oftmals Implementierungsdetails „bis zum letzten Bit“ entscheidend sind.

4 User Interface Design von Energiedaten in energie-intensiven Betrieben; *Hochschule Ansbach – Fakultät Technik; Prof. Dr. W. Schlüter, M.Sc. J. Dettelbacher, M.Sc. J. Hanna, M.Sc. D. Wagner, M.Sc. K. Zacharias, B.Eng. F. Mielke, B.Eng. D. Broszeit*

4.1 Einleitung und Motivation

Im Dezember 2020 stimmten die Staats- und Regierungschefs der Europäischen Union für eine Erhöhung des EU-Klimaziels des Green Deals der Europäischen Kommission. Die EU soll im Jahr 2030 55 % weniger Treibhausgase als im Vergleichsjahr 1990 ausstoßen. Als ein entscheidender Bereich für die Erreichung des Ziels wurde die Energieeffizienz identifiziert. Besonders hoch ist das Einsparpotenzial in energieintensiven Industriezweigen, wie z. B. der Nicht-Eisen-Gussindustrie. In Deutschland werden jährlich 5,4 Mio. t Metall erschmolzen und vergossen, davon 1,2 Mio. t Nicht-Eisen-Werkstoffe. Geht man von einem Energieeinsatz von 2000 kWh pro Tonne guter Guss aus, ergibt sich ein jährlicher Energieverbrauch von 2,4 Mrd. kWh in der Nicht-Eisen-Gussindustrie.

Große Herausforderungen für die Branche sind, neben der Energiewende, die Digitalisierung der langlebigen Produktionsanlagen, auf Grund der oft veralteten Steuerungstechnik, und die E-Mobilität mit einem sich stark veränderten Bedarf an bestimmten Gussteilen. Nach einer offiziellen Auswertung des Statistischen Bundesamtes beträgt der Energiekostenanteil an der Bruttowertschöpfung der Gießerei-Industrie über 25 %. Dies zeigt, dass der Energieverbrauch nicht nur hinsichtlich der CO₂-Einsparung in Deutschland, sondern auch für Gewinn und Wettbewerbsvorteile der Gussunternehmen in dieser schwierigen wirtschaftlichen Umbruchphase entscheidend sein kann.



Abbildung 4.1: IR-Aufnahme eines Aluminium-Schmelzofens.

Im Projekt User Interface Design von Energiedaten im Forschungsbereich EFFIZIENZ wird versucht, über verschiedene Digitalisierungsansätze die Branche bei dem notwendigen Transformationsprozess zu unterstützen. So wurde mit einem kooperierenden Gussbetrieb prototypisch eine Lösung entwickelt, die verschiedenen Nutzergruppen Energie- und Produktionskennzahlen auf mobilen Endgeräten in geeigneter Form zu 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.

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 Energiecampus Nürnberg unter der Leitung von Prof. Schlüter

erstmalig die zweitägige Fachtagung *Digitalisierung in der Gießereiindustrie* statt. Darin wurden Probleme und Lösungsmöglichkeiten von namhaften Experten aus Industrie und Wissenschaft einem interessierten Fachpublikum vorgestellt.

4.2 Prozessmonitoring und digitale Störfallanalyse

Mittelständische Gießereiunternehmen verfügen oftmals nur über einen sehr geringen digitalen Reifegrad. Hier fehlen einfach zu implementierende Lösungen, um die Kompetenzlücke zu Großunternehmen zu schließen. Zwar wird die Digitalisierung als wichtig beurteilt, jedoch gelingt es einem Großteil der Unternehmen nicht, diese in der Unternehmensstrategie erfolgreich zu verankern. Ein Grund hierfür ist, dass sich der Nutzen einer IT-Lösung nicht immer im Vorfeld quantifizieren lässt und somit den Unternehmen ein vorgegebener Return-On-Investment (ROI) nur selten gewährleistet werden kann. Dieses Investitionsrisiko und die oft fehlende Expertise in Digitalisierungslösungen führen zu Vorsicht und Hemmungen. Eine Lösungsmöglichkeit sind Pilotprojekte zwischen Unternehmen und Forschungspartnern, welche die Potenziale der Digitalisierung ohne erheblichen finanziellen Aufwand aufzeigen. Im Forschungsbereich EFFIZIENZ wurde in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner *pressmetall Gunzenhausen GmbH* eine prototypische Softwarelösung mit dem Ziel entwickelt, über ein digitales Abbild des Produktionsprozesses diesen transparenter zu gestalten und die Liefertreue für das Unternehmen zu verbessern.

In dem Softwaretool werden die Maschinendaten aus der Produktion gesammelt und für verschiedene Nutzergruppen visualisiert. Die Ansichten umfassen eine Überblicksdarstellung der Produktion, ein Dashboard für die produzierenden Druckgussmaschinen (Abbildung 4.2), die Anzeige der Prozessstabilität sowie eine Übersicht über produktionsbezogene Kennzahlen der Maschinen. Störfälle der produzierenden Druckgussmaschinen werden aufgelistet. Gemäß des im Projektantrag verankerten Paradigmas einer nutzerspezifischen Anzeige der Daten ist die Software, welche als verteilte Desktop-Anwendung realisiert ist, frei konfigurierbar. Durch die Bereitstellung der individualisierten Dashboards konnte die Produktionsplanung und die Instandhaltung verbessert werden, was zu einer Steigerung der Material- und Energieeffizienz im Betrieb geführt hat.

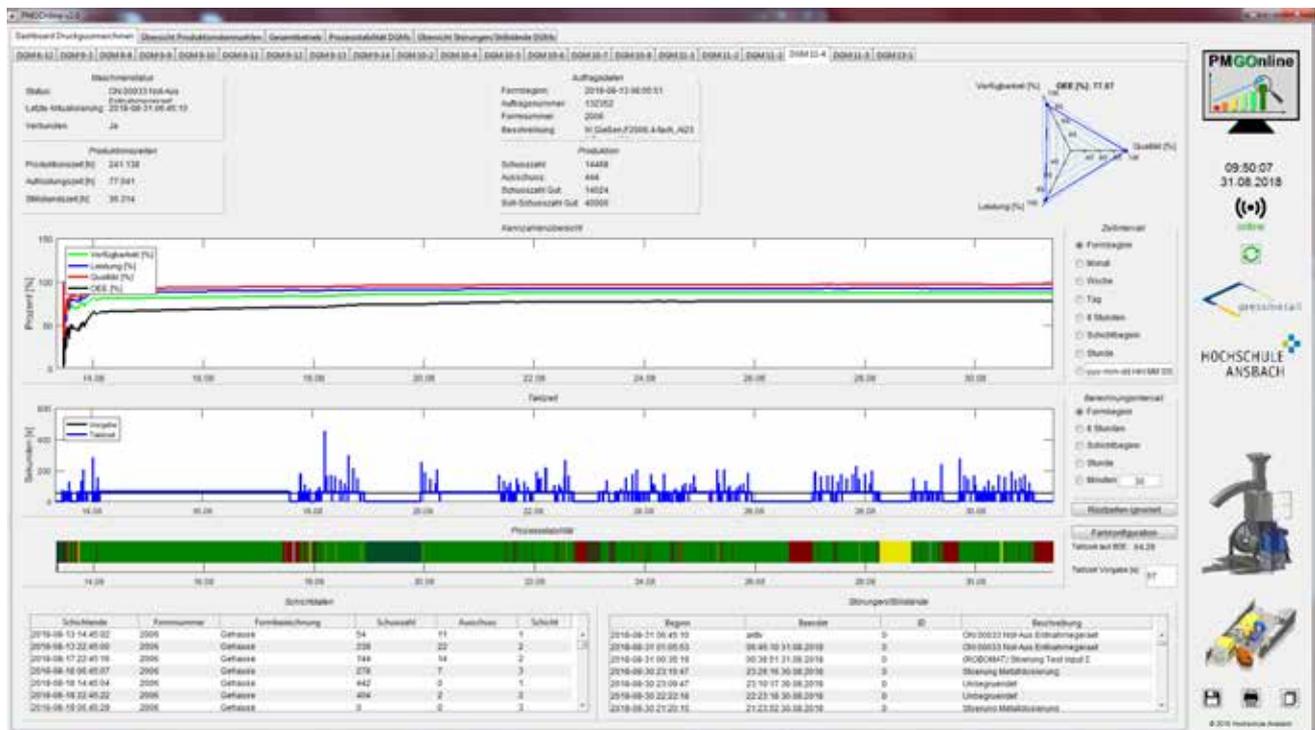


Abbildung 4.2: Dashboard des Prozessmonitoring-Systems.

Um den Nutzen des Prozessmonitoring-Systems zu erfassen, wurde eine Benutzerbefragung durchgeführt, die zeigte, dass die Software jeweils täglich bzw. wöchentlich zur Entscheidungsunterstützung bei der Produktionsplanung genutzt

wird. Ein weiteres Ergebnis der Befragung war der Wunsch nach einer Möglichkeit zur Analyse von Störfällen sowie nach einer Anzeige der Maschinendaten auf mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets.

Für die Störfallanalyse wurde im Forschungsbereich EFFIZIENZ die Software DownTime Explorer entwickelt, welche wie das Prozessmonitoring-System auf die zentrale Datenbank der Produktionsdaten zugreift und die Störungsdaten der Maschinen analysiert. Die Software gibt dem Nutzer die Möglichkeit, die Störungshistorie deskriptiv zu untersuchen und Maschinen mit besonders geringer Verfügbarkeit sowie die Gründe für die häufigsten Ausfälle an diesen Maschinen zu erkennen. So können zum Beispiel die Fehler nach Störungsdauer und Störungstyp den Maschinen zugeordnet und in einem Balkendiagramm dargestellt werden. Auch eine Auswertung in Abhängigkeit von der Gussform kann durchgeführt werden. Die Software ermöglicht es dem Unternehmen, den technologischen Schritt von der Ausfallbehebung und der zeitgesteuerten periodischen Instandhaltung zur zustandsorientierten Instandhaltung zu vollziehen, was zu einer höheren Produktivität und zu einer Steigerung der Energieeffizienz führt.

Um das Monitoring im Betrieb zu optimieren und auf mobile Verwendbarkeit zu erweitern, wurde eine webbasierte Lösung entwickelt, die auf Grund der strikten Trennung von Datenakquisition und Visualisierung parallel zur schon im industriellen Einsatz befindlichen Desktop-Lösung eingesetzt werden kann (Abbildung 4.3). Ein wesentlicher Vorteil dieser Lösung ist, neben der mobilen Anzeige, die stark verkürzte Aktualisierungszeit der Ansichten und weitere Entwicklungsoptionen wie das Einrichten von eMail-Benachrichtigungen.



Abbildung 4.3: Webbasiertes Prozessmonitoring-System im industriellen Einsatz.

Die Bedeutung einer derartigen Anwendung wurde in verschiedenen Vorträgen auf Veranstaltungen des Bundesverbandes der Deutscher Gießereiunternehmen in die Branche hinein kommuniziert. Die Erfahrungen bei der Umsetzung fließen auch in die Arbeit des Projektleiters Prof. Dr. Wolfgang Schlüter in dem Fachausschuss Gießerei 4.0 ein, in dem der Bundesverband der Deutschen Gießereiunternehmen (BDG) Unternehmen Hilfestellung bei der digitalen Transformation geben möchte. Dazu hat der Arbeitskreis den *BDG-Kompass - Gießerei 4.0 (Entwicklungsschritte zur digitalen Produktion)* veröffentlicht, in dem anhand von Reifegradmodellen verschiedene Aspekte der digitalen Produktion beleuchtet werden. Um die im *BDG-Kompass* untersuchten Digitalisierungsbereiche in die Betriebsstruktur der Unternehmen einzuordnen, wurde im Forschungsbereich EFFIZIENZ ein Übersichtsmodell entwickelt. In der Übersicht, die im *BDG-Kompass* den Reifegradmodellen vorangestellt ist, liegt ein Schwerpunkt auf der Verzahnung der einzelnen Digitalisierungsbereiche.

4.3 Intralogistische Energieeffizienzmaßnahmen

In dem Green Factory Bavaria-Projekt E|Melt wurden die Auswirkung verschiedener intralogistischer Maßnahmen simulativ untersucht. In einer hybriden Simulation konnte die komplette innerbetrieblichen Lieferkette mit Flüssigaluminium und die energetischen Prozesse in den Schmelzöfen abgebildet werden. Folgende Energieeffizienzmaßnahmen wurden auf ihre Wirksamkeit hin untersucht:

- Vorwärmung des festen Materials durch den Abgasstrom der Öfen
- optimierte Beschickung der Schmelzöfen
- verbesserte Verteilung des Flüssigaluminiums auf die produzierenden Druckgussmaschinen

Im Ergebnis wurden erhebliche energetische Einsparpotentiale (Tabelle 7), eine Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität (OEE) und eine Erhöhung der Betriebssicherheit festgestellt. Anhand der Simulation ergibt sich für die deutsche Nichteisengussindustrie bei Anwendung der obigen Effizienzmaßnahmen ein Einsparpotential von etwa 250 GWh thermisch und eine CO₂-Reduktion um ca. 50 000 t.

Tabelle 7: Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen für unterschiedliche Betriebsgrößen.

	spezifischer Energieverbrauch [kWh/t]	
	ohne Effizienzmaßnahmen	mit Effizienzmaßnahmen
Großer Betrieb 70.000 t Al/a	1007	759
Mittelgroßer Betrieb 14.500 t Al/a	857	706
Kleiner Betrieb 8.400 t Al/a	1033	798

Ein Online-Demonstrator (unter <https://www.hs-ansbach.de/emelt> frei verfügbar) macht die Ergebnisse in einfacher Weise der Industrie zugänglich. Darin wird dem Nutzer nach Auswahl des Betriebes und den durchgeführten Maßnahmen der Erfolg hinsichtlich Energieeinsparung, Gesamtanlageneffektivität und Betriebssicherheit visualisiert (Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Online-Demonstrator.

Beim Warmhalten des Flüssigaluminiums für den Produktionsprozess stellt sich die Frage, ob dies in den Warmhalteöfen des Schmelzbetriebes oder an den Dosieröfen der produzierenden Druckgussmaschinen erfolgen soll. Da die Dosieröfen im Gegensatz zu den gasbefeuerten Warmhalteöfen elektrisch beheizt werden, sind hier die spezifischen Energiekosten deutlich höher. Durch eine Kopplung der Simulation mit einer dynamischen Optimierung wurde diese Problemstellung im Forschungsbereich EFFIZIENZ untersucht (Abbildung 4.5). Es konnte gezeigt werden, dass durch Einsatz einer geeigneten Steuerung die warmzuhaltende Masse in den Dosieröfen der Druckgussmaschinen um 40 % reduziert werden

kann, ohne die Produktion zu gefährden. Um die Energieeinsparung durch diese Maßnahme zu bestimmen, wird aktuell ein Energiemodell für die Dosieröfen entwickelt. Damit wird sich dann die erzielbare Energieeinsparung genauer quantifizieren lassen.

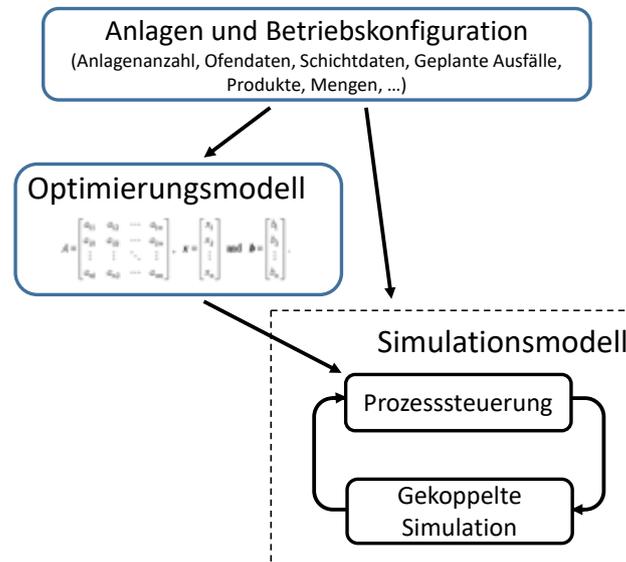


Abbildung 4.5: Kopplung von Simulation und Optimierung.

4.4 Energieeffizienz durch Abwärmeverstromung

Das technisch-wirtschaftliche Potential der Abwärmenutzung (Temperaturniveau über 60 °C) wird in erster Näherung auf 18 % des Endenergieeinsatzes der deutschen Industrie geschätzt. Die Nutzung der Abwärme ist je nach Industriezweig unterschiedlich fortgeschritten. Dies liegt vor allem an den unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten in den einzelnen Branchen. So wird in der Ziegelindustrie die Abwärme zur Trocknung der Ziegel genutzt. In der Aluminium-Gussindustrie gibt es Ansätze, die Abwärme zum Vorwärmen des festen Aluminiums im Schmelzbetrieb zu nutzen. Dabei erfordert das Einbinden einer externen Vorwärmkammer gerade beim Nutzen verschiedener Legierungen große intralogistische Anpassungen. Eine weitere Möglichkeit der Abwärmenutzung besteht in der Vorwärmung der Brennerluft. Bei der Größenordnung des Energieeinsatzes beim Aufschmelzen des festen Aluminiums im Schmelzofen (50 % des Energiebedarfs eines Druckgussbetriebes), kann darüber aber nur ein geringer Prozentsatz der thermischen Energie des Abgases verwertet werden.

Zur Verstromung von Abwärme mit Temperaturen höher als 400 °C hat das Start-Up-Unternehmen Turbonik GmbH, Gewinner des Wettbewerbs *Energie-Start-Up Bayern 2018*, eine Mikrodampfturbine entwickelt, die die im Kraftwerksbereich genutzte Technologie für kleinere Anwendungen nutzbar macht. Die Mikrodampfturbine benötigt für den dauerhaften Betrieb einen konstanten Abwärmestrom, was ein Problem bei der volatilen Abwärme im Aluminium-Schmelzbetrieb darstellt. Im Forschungsbereich Effizienz wurde in Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen von Prof. Krcmar (Teilprojekt 1: Energieeffiziente Gebäudehülle) und Prof. Opferkuch (Nuremberg Campus Of Technology NCT, Kompetenzzentrum Energietechnik) ein Anlagenkonzept entwickelt, das zur Pufferung eines Überangebots an Wärme und zur temporären Bereitstellung zusätzlicher Wärme einen Regenerator als thermischen Wärmespeicher vorsieht (Abbildung 4.6).

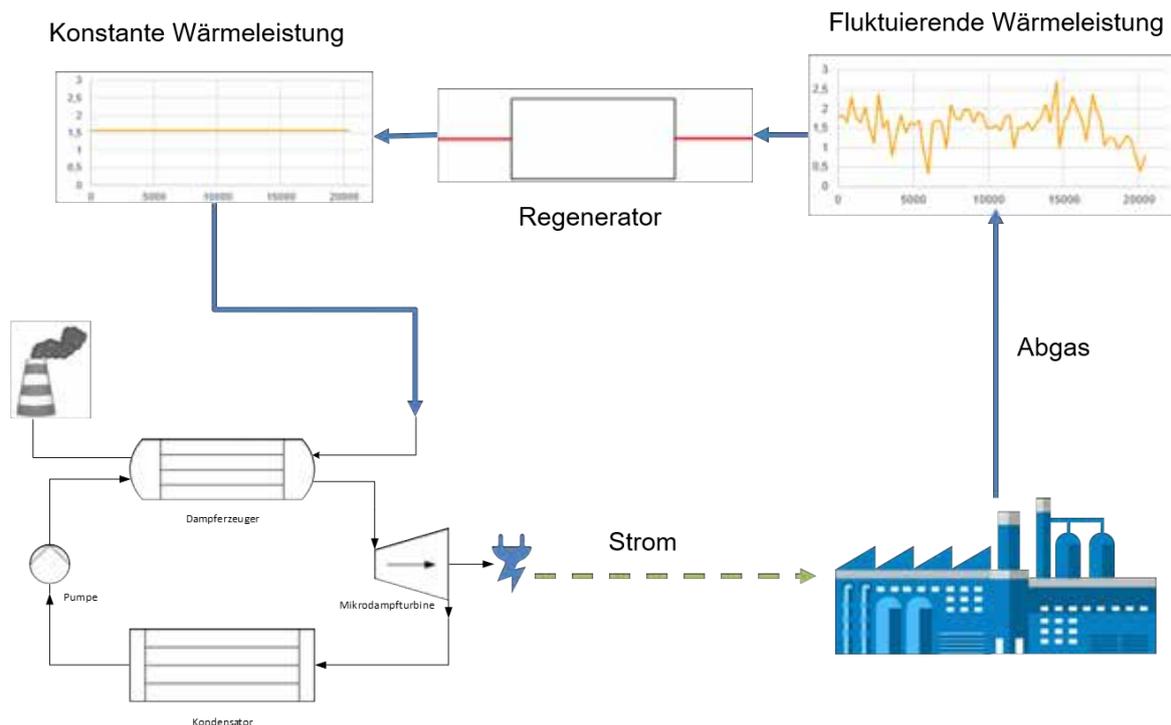


Abbildung 4.6: Anlagenkonzept zur Abwärmeverstromung bei fluktuierender Wärmeleistung.

Das Anlagenkonzept erfordert die Entwicklung eines geeigneten Wärmespeichers und einer komplexen Regelungsstrategie. Aus verfahrenstechnischen Gründen soll die Abwärme in zwei Regeneratoren gespeichert und entladen werden (Abbildung 4.7).

Für die Dimensionierung der Regeneratoren wurde ein umfangreiches Simulationsmodell erarbeitet, das die Simulation der thermodynamischen Vorgänge umfasst und die Abbildung verschiedener Steuerungsstrategien ermöglicht. Für das dynamische Prozessmodell der beiden Regeneratoren werden die Wärmeübergangskoeffizienten mit Hilfe von CFD-Simulationen berechnet. Die Steuerung der Klappen in Abbildung 4.7 wird über einen endlichen Automaten modelliert, der mit dem Regeneratoren-Modell gekoppelt wird, um so die Simulation des Regelkreises zu ermöglichen. Anhand der verfahrenstechnischen Parameter und des dynamischen Verhaltens des Abwärmestroms lassen sich über die Simulation die Regeneratoren auslegen, so dass starke Schwankungen in der Wärmeleistung ausgeglichen werden können, ohne dass die Regeneratoren überdimensioniert sind.

Aktuell wird die Einsatzmöglichkeit des Anlagenkonzeptes in einem großen Nürnberger Aluminium-Druckgussbetrieb geprüft. Problematisch ist dabei der Einbau in eine bestehende Abgasführung, die über eine Bypass-Lösung erfolgen soll. Für den auftretenden Druckverlust gibt es dabei betriebsbedingt bestimmte Obergrenzen, die einzuhalten sind. Eine weitere Herausforderung ist die Schadstoffbelastung des Abgases, die sowohl für den Dampfzeuger als auch für die Regeneratoren ein Reinigungskonzept erforderlich machen.

Der durch die Mikrogasturbine erzeugte Strom kann entweder zur Eigenstromnutzung verwendet oder in das Netz eingespeist werden. Das finanzielle Einsparpotential durch die Stromerzeugung und die Reduzierung des CO₂-Footprints sind, wie Beispielrechnungen zeigen, beachtlich, so dass auch komplexere Lösungsstrategien für die oben genannten Probleme lohnend erscheinen.

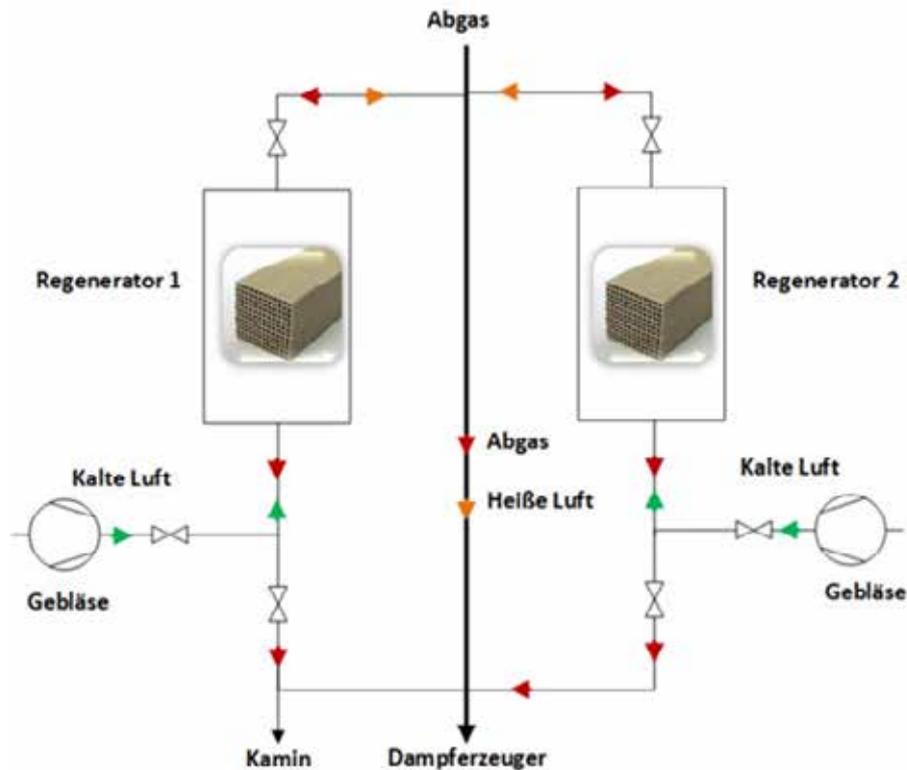


Abbildung 4.7: Verfahrenstechnisches Anlagenschema.

4.5 Numerische Auslegung von Gussbauteilen entlang der Prozesskette

Das Ziel des Forschungsprojektes *DNAguss*, das im Rahmen des 7. Energieforschungsprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird, ist die erstmalig durchgängige numerische Auslegung von Gussbauteilen entlang der Prozesskette. Dadurch wird eine effiziente und kostengünstige Entwicklung von höchst leistungsfähigen Gussbauteilen für die Windenergiebranche, den Großmaschinenbau und sowie kleineren in Serienfertigung hergestellten Gussbauteilen ermöglicht. Die betrachteten Disziplinen, die in einer Prozesskette verknüpft werden sollen, sind der CAD-Entwurf, die Werkstoffsimulation, die Gießprozesssimulation, die Betriebsfestigkeitssimulation und die zerstörungsfreie Prüfung. In jeden dieser Bereiche werden Bauteile digital abgebildet.

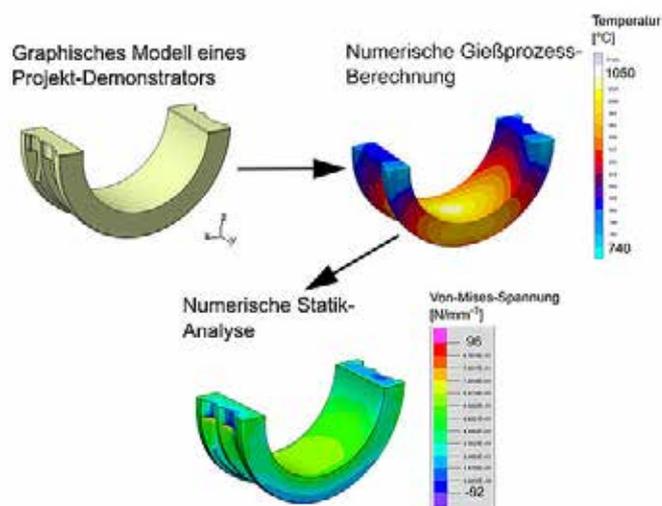


Abbildung 4.8: Bausteine der numerischen Prozesskette.

Die Aufgabe des Kompetenzzentrums Industrielle Energieeffizienz (KIEff) im Forschungsbereich Effizienz besteht darin, die einzelnen Simulationsdisziplinen ohne Datenverlust in einer numerischen Prozesskette zu verknüpfen. Unter der Projektleitung des Fraunhofer-Institutes für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF sind neben dem KIEff das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, verschiedene Softwareanbieter wie die Magma Gießtechnologie GmbH als der weltweit führende Anbieter von Gießprozesssimulationen und die Magna International In. als Entwickler der Software FEMFAT, mit der Lebensdaueranalysen durchgeführt werden, beteiligt. Um die Tauglichkeit der Forschungsergebnisse im realen Gussbetrieb zu prüfen, wirken mehrere Eisen-Großguss-Unternehmen in dem Projekt mit.

Bei der Analyse des Arbeitsablaufes in den Gießereiunternehmen hat sich gezeigt, dass in der Branche bis jetzt keine einheitliche Vorstellung über die numerische Prozesskette existiert. In einem ersten Schritt wurde vom KIEff in enger Abstimmung mit den Projektpartnern daher eine sich evolutionär aufbauende Beschreibung der Prozesskette in fünf Schritten entwickelt. Ausgehend von der einfachsten Form, der linearen Prozesskette, wird diese nach und nach um die Schritte:

- Erweiterter Ablauf mit ZfP-Simulation und Materialdatenbank
- Rückkopplungsmechanismen
- Virtuelles Design of Experiments/Topologieoptimierung
- Materialcharakterisierung/ Informationsfluss

erweitert. Der Kern der Prozesskette liegt in dem linearen Ablauf, der die Gießprozesssimulation und die Festigkeitsanalyse verbindet (s. Abbildung 4.9). Als Ausgangspunkt wird die Geometrie des Bauteils als 3-D CAD-Datei an die entsprechenden Softwaretools für die weitere Bearbeitung übergeben. Beginnend mit der Gießprozesssimulation erfolgt die Berechnung von Eigenspannungen und lokalen Materialeigenschaften (z.B. das E-Modul), die als Rahmenbedingungen in die Strukturanalyse importiert werden. Die Strukturanalyse berechnet die Spannungen am Bauteil unter der Berücksichtigung von Nutzlasten. Das nächste Glied in der linearen Prozesskette ist die Lebensdaueranalyse. Dessen Rolle ist, anhand von importierten Ergebnissen aus der Gießprozesssimulation (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung) und Strukturanalyse (lokale Spannungen) die Bauteilermüdung und die Sicherheitsfaktoren pro Bauteilregion zu berechnen.

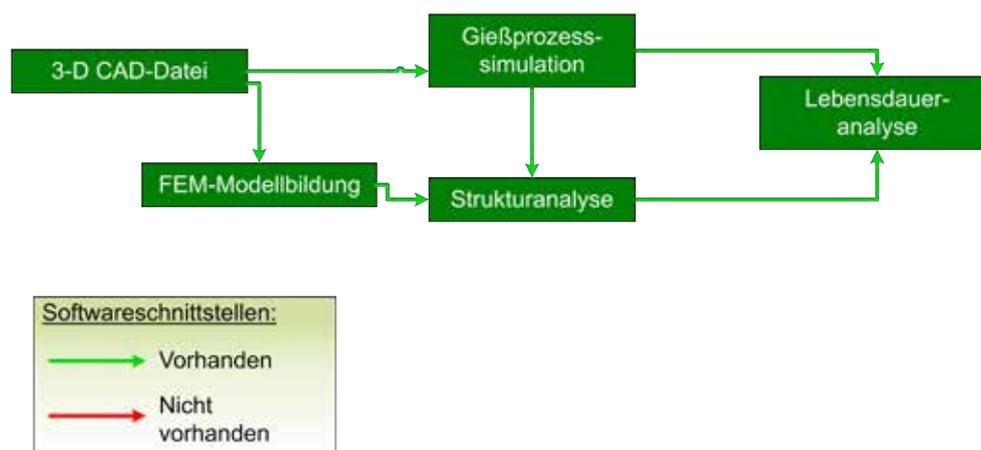


Abbildung 4.9: Prozesskette: Linearer Ablauf.

In Abbildung 4.10 ist die vollständige Prozesskette mit den zwei Werkzeugen Design of Experiments (DoE) und Bauteil-Topologieoptimierung dargestellt. Durch Schleifen in der Prozesskette kann in einem iterativen Prozess ein optimales Gussystem und Bauteildesign gefunden werden. Dazu kommen die Informationen aus der ZfP-Simulation, die besagen, welche Region mit welchem Testverfahren untersucht werden kann. Das Ergebnis liefert den Topologieoptimierung- und Lebensdaueranalyse-Bausteinen in der Prozesskette die Prüfbarkeit von einzelnen Regionen am Bauteil. Die Bereitstellung der Methoden zur Materialcharakterisierung mit Daten aus der Fachliteratur und experimentellen Untersuchungen ergänzen die Prozesskette.

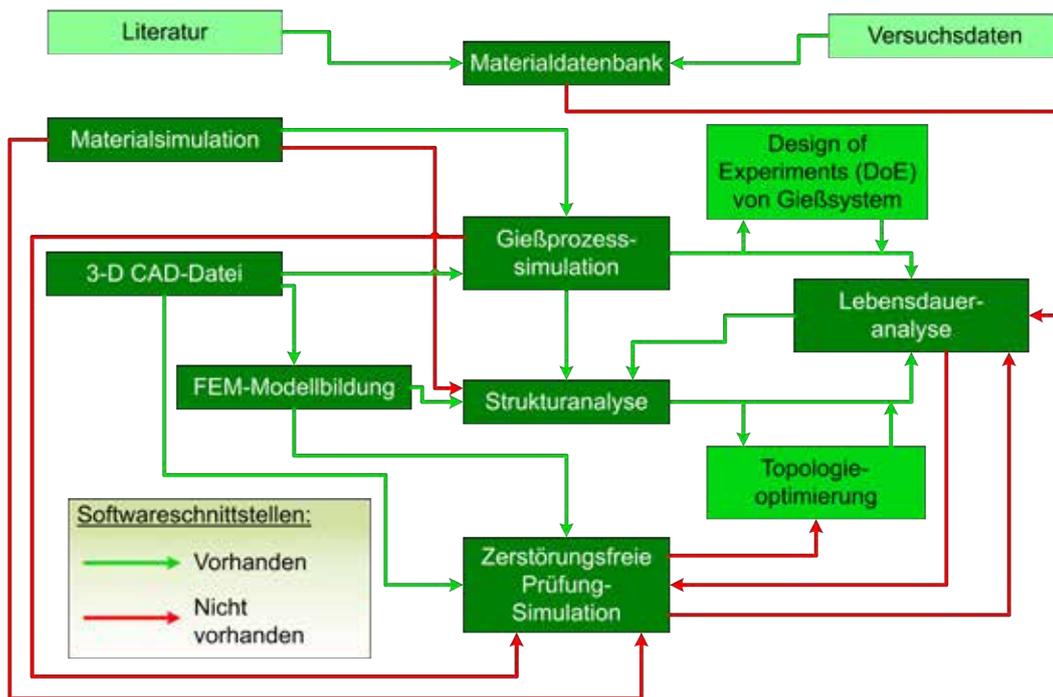


Abbildung 4.10: Vollständige Prozesskette.

Neben den Bausteinen der Prozesskette werden in der Abbildung 4.10 auch die noch nicht vorhandenen Schnittstellen identifiziert. Um diese Lücken in der Prozesskette zu schließen und so eine durchgängige numerische Auslegung erst zu ermöglichen, wurde im Forschungsbereich EFFIZIENZ ein allgemeingültiger Ansatz zur Schnittstellenprogrammierung entwickelt. Dabei wird die Grammatik der benutzten Dateiformate mit Hilfe einer Metasprache, der Extended Backus-Naur Form (EBNF), beschrieben. Bei der Schnittstellenprogrammierung wird zwischen dem Datei-Ausgabeformat der Sender-Software und dem Datei-Einleseformat der Empfänger-Software unterschieden. Zur Generierung der Schnittstelle bzw. des Konvertierungsprogrammes wird nur noch die Grammatik des Datei-Ausgabeformates der Sender-Software in EBNF mit den Übersetzungsinformationen benötigt. Die im Forschungsbereich Effizienz entwickelte Software liest die Beschreibung der Grammatik und des Übersetzungsvorganges ein und erzeugt daraus die entsprechende Zielformat im Datei-Einleseformat (Abbildung 4.11).

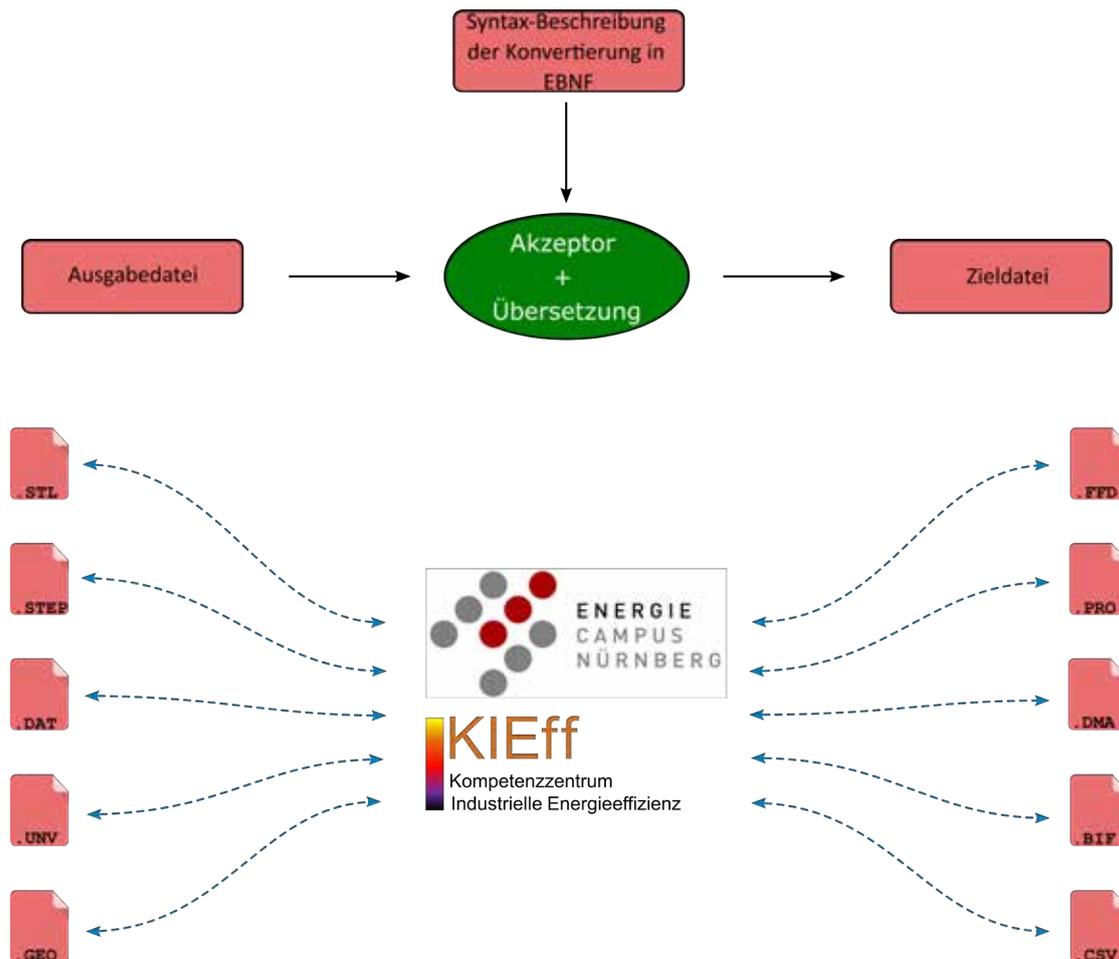


Abbildung 4.11: EBNF-basierter Ansatz zur Schnittstellenentwicklung.

Das Konzept wurde bereits für erste Konvertierungen erfolgreich erprobt. Durch die Nutzung der metasprachlichen Beschreibung der Syntax des Austauschformates zwischen Softwarepaketen ist damit die Basis für die softwaretechnische Realisierung von komplexen Konvertierungstools geschaffen (Abbildung 4.11). Die Konvertierungstools schließen die Lücke in der Prozesskette. Die Kopplung der Softwarepakete birgt ein großes Optimierungspotential bei der Entwicklung neuer Bauteile. Softwaretools von der Konstruktion bis zur Lebensdaueranalyse, die bisher oft nur isoliert verwendet werden, können damit in ihrer vollen Leistungsfähigkeit genutzt werden. Dies ermöglicht eine energie- und materialeffizientere Produktion, erhöht die Produktqualität und steigert die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandortes Deutschland.

4.6 Forschungsbereich Effizienz auf der EUROGUSS 2020

Vom 14. – 16. Januar 2020 fand auf der Messe Nürnberg die EUROGUSS 2020, die größte europäische Druckgussmesse statt. Insgesamt 754 Aussteller, davon 56 % aus dem Ausland, präsentierten den rund 15.000 Fachbesuchern die neuesten Trends in Technik, innovative Prozesse und Produktneuheiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Druckgusses. Auf der Sonderschau *Forschung, die Wissen schafft* war neben dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle WTM an der Universität Erlangen-Nürnberg, dem Österreichischen Gießerei-Institut und dem Gießerei-Institut der Universität Kassel das Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz vertreten. In einer interaktiven Präsentation zeigte das KIEff der Hochschule Ansbach seine Forschungsergebnisse unter dem Motto Energieeffizienz durch Digitalisierung. Das im Forschungsbereich EFFIZIENZ entwickelte und im industriellen Einsatz befindliche Prozessmonitoring-System wurde ebenso präsentiert wie die Arbeitsbereiche Digitale Störfallanalyse, Energieeffizienz durch intralogistische Maßnahmen, Abwärmenutzung, Virtuelle Inbetriebnahme und Optimierung des Wärmetransportes durch Strömungssimulation. Zahlreiche Besucher aus der Gießereibranche aber auch aus

Universitäten, Hochschulen und von Fachverbänden konnten sich von der Relevanz und der Anwendungsnähe der am KIEff geleisteten Forschung überzeugen, so dass es in der Folge zu einer Reihe von Kooperationsgesprächen kam.



Abbildung 4.12: Messestand auf der EUROGUSS 2020.

Bei der im Vorfeld der Messe stattfindenden Plenarsitzung des Fachausschusses Druckgusses des *Bundes Deutscher Gießereiu nternehmen (BDG)* wurden den Anwesenden durch Prof. Schlüter, dem Leiter des KIEff, in einer längeren Präsentation die im Forschungsbereich EFFIZIENZ entwickelten Ideen zur Abwärmennutzung in der Gussindustrie vorgestellt. Das sehr positive Echo des Plenums, dass aus hochrangigen Industrievetretern bestand, zeigte sich auch in der Einladung, den Vortrag für weitere Fachgliederungen des *BDG* aufzubereiten.

4.7 Ausblick

Motiviert durch den erfolgreichen industriellen Einsatz des im KIEff entwickelten Prozessmonitoring-Systems ist geplant, mit den gewonnenen Erkenntnissen gemeinsam mit einem regionalen Softwareunternehmen ein professionelles Werkzeug zum branchenspezifischen Prozessmonitoring und als Hilfsmittel zur vorbeugenden Instandhaltung (Predictive Maintenance) zu entwickeln. Am Beispiel eines kooperierenden Gussunternehmens mit 5 Betrieben soll die Datenerfassung, das Monitoring und die Kopplung mit dem ERP-System realisiert werden. Das Gussunternehmen definiert die relevanten Betriebsdaten, die benötigten Kennzahlen und die gewünschten Auswertungsschemata. Die gewöhnliche statistische Datenauswertung soll mit Methoden der Mustererkennung erweitert werden, um datengetriebene Modelle zu entwickeln, welche das Betriebsverhalten prognostizieren können. Dadurch können Wartungsprognosen von den Produktionsmaschinen sowie Vorhersagen über die Qualität der gefertigten Produkte realisiert werden. Diese Aspekte tragen maßgeblich zur Produktivität und Energieeffizienz des Betriebes bei.

Das am Forschungsbereich EFFIZIENZ entwickelte Konzept zur Abwärmeverstromung soll in einer Demonstrationsanlage in einer großen Nürnberger Gießerei umgesetzt werden. Durch Gespräche mit Komponentenanbietern, simulative Untersuchungen des Druckverlustes und Messungen in der Abgasführung soll der Betrieb der Demonstrationsanlage, für deren Finanzierung im Rahmen des 7. Energieforschungsprogrammes geplant ist, vorbereitet werden.

Eine weitere Möglichkeit, die ungenutzte Abwärme von Gießereien energetisch zu bewerten, wird aktuell am Beispiel eines Guss-Unternehmens in Kitzingen geprüft. Dabei soll aus einem flüssigen Wasserstoffträger (LOHC) durch Dehydration Wasserstoff gewonnen werden, der in einer Brennstoffzelle verstromt werden kann (Abbildung 14). Die Forschungsgruppe bestehend aus dem KIEff, dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg und der Hydrogenious LOHC Technologies GmbH untersucht auch die Möglichkeit einer Reduzierung des Gasverbrauchs der Schmelzöfen durch Zusatz von Wasserstoff.

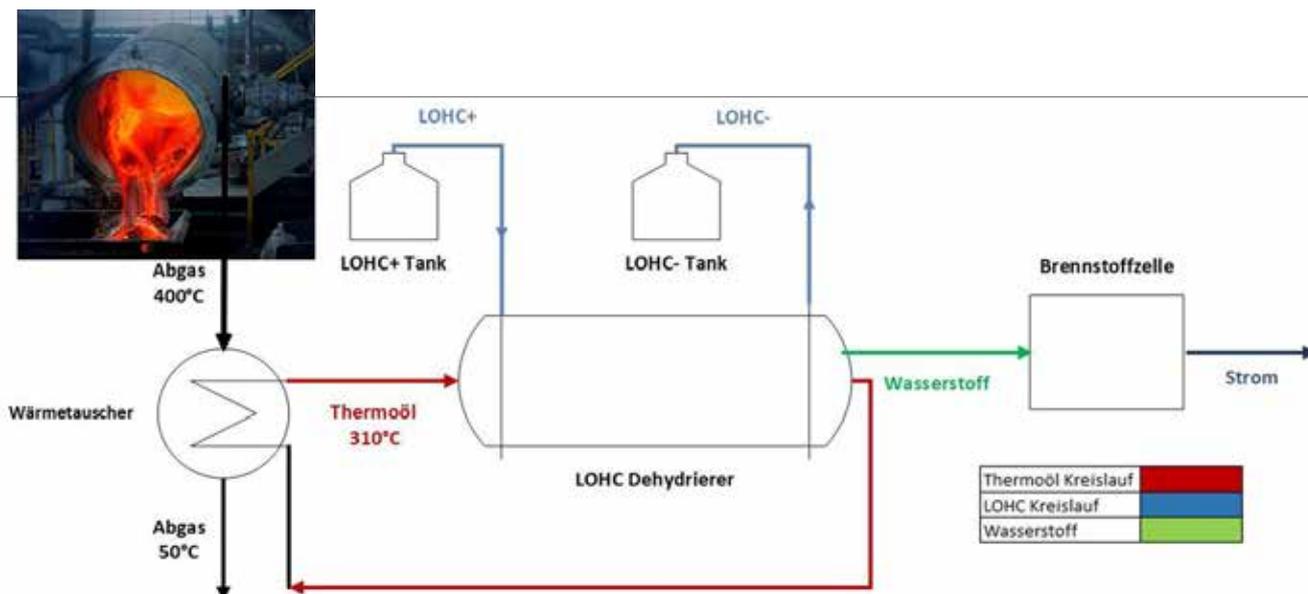


Abbildung 14: LOHC-Dehydrierung im Gießereiunternehmen

Für das Konvertierungstool im DNAguss-Projekt haben sich nach der Vorstellung bei den Projektteilnehmern eine Vielzahl von Anwendungen ergeben. In der weiteren Entwicklung wird vor allem Wert auf eine einfache Bedienung des Tools mit Hilfe einer intuitive bedienbaren grafischen Nutzeroberfläche durch den Anwender gelegt, umso die Akzeptanz weiter zu erhöhen und sich weitere Anwendungen zu erschließen.

5 Schlussworte

Der Forschungsschwerpunkt EFFIZIENZ im EnCN wird von den beiden Arbeitsgruppen „Energieeffiziente Gebäude“ und „Energieeffiziente Industrie“ bearbeitet. Die Akteure haben im Berichtszeitraum alle geplanten Forschungsarbeiten sehr erfolgreich durchgeführt. Als Leuchtturmprojekt für den EnCN kann das Modellvorhaben „Herzo Base - Energiespeicherrhäuser“ angesehen werden, das jetzt mit dem Folgeprojekt „Herzo Opt“ in ein Langzeitmonitoring übergegangen ist. Die Arbeitsgruppe war auch im Jahr 2020 bei der Beantragung neuer Forschungsvorhaben und der Einwerbung zusätzlicher Drittmittel besonders erfolgreich. Die Höhe der Drittmittel-Einnahmen betrug im bisherigen Förderzeitraum vom 01.01.2017 bis 31.12.2020 insgesamt 8.974.000 €. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und in neue Laborausstattung investiert werden. Die Arbeitsgruppe bestand im Berichtszeitraum aus 26 Mitarbeitern zuzüglich den beteiligten Professoren und den Studierenden, die als studentische Hilfskräfte in den Projekten mitarbeiten. Es wird derzeit an laufenden F&E-Projekten gearbeitet; bewilligte neue Vorhaben wurden gestartet und an Neuanträgen und Publikationen wird ständig gearbeitet.

Mit den erfolgreich eingeworbenen Drittmitteln gelang der Arbeitsgruppe u.a. die Inbetriebnahme eines Sekretariats mit einer halbtägigen Teamassistentin sowie einem weiteren Mitarbeiter für die Koordination von F&E-Projekten. 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. Es wurden außerdem erfolgsversprechende Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt und weiter ausgebaut.

6 Vorträge & Poster 2020

- [1] Zeyer, K., Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: Poster: „*Optimization of the structure of ceramic heat storage materials for electrically heated and dynamically stored direct steam generators*“; Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg, 22.01.2020, THN/EnCN.
- [2] Hildebrand, J. S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktdampferzeuger*“; Jahrestreffen 2020 d. Arbeitsgruppe „Speicher A“, Prof. Dr. Karl (FAU), 26.05.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [3] Zeyer, K., Hildebrand, J. S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Parameter study for the optimization of sensible high temperature thermal energy storage materials*“; Lokale Online-Masterkonferenz Nürnberg SS 2020, 17.07.2020, Studiengang „Master of Applied Research“, Technische Hochschule Nürnberg.
- [4] Hildebrand, J. S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste – neue Beschichtungsergebnisse*“, 18. Arbeitssitzung des „Innovationsring Hintermauerziegelindustrie“ der CERAMIX AG, 21.10.2019, Energie Campus Nürnberg.
- [5] Hildebrand, J. S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Einfluss der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik*“, 18. Arbeitssitzung des „Innovationsring Hintermauerziegelindustrie“ der CERAMIX AG, 21.10.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [6] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Auswirkung der Porenform auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Ziegelkeramik*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [7] R. Karsdorf, D. Sappa und W. Krcmar: 2 Vorträge: „*Einfluss der neu entwickelten Schallstopper-Technologie auf die HV-Lochung von Hochlochziegeln, Teil I und Teil II*“; F&E-Projekt „Ziegel 2020 - Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“, FKZ 03ET1526A, Meilensteinsitzung am 06.03.2020 im Ziegelwerk Turber, Pförring.
- [8] Roth, T., Allar, C. und Krcmar, W.: Poster: „*Quantitative analysis of hydrophobic surface groups in silica aerogels using Simultaneous Thermal Analysis (STA)*“; Dauerausstellung im EnCN, 22.01.2020, THN/EnCN.
- [9] Hildebrand, J. S. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktdampferzeuger*“; anlässlich Jahrestreffen 2020 der Arbeitsgruppe „Speicher A“, Prof. Dr. Karl (FAU), 26.05.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [10] Sappa, D., Karsdorf, R. und Krcmar, W.: Roll-Up und Onepager: „*Ziegel 2020 - Entwicklung des Ziegels der Zukunft mittels Rapid Prototyping*“; anlässlich Inbetriebnahmefeier der Forschungsanlage „Mikrodampfturbine“ der TH Nürnberg, Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg, 30.01.2020.
- [11] Allar, C., Oeder, K. und Krcmar, W.: Presentation: „*Energy efficient building materials*“; EU-Project „*Light Coce - Building an Ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures*“, EU-Project-Number: 814632 – Horizon 2020, 2nd Plenary Meeting, 14./15.01.2020, THN/EnCN, Nuremberg.
- [12] Krcmar, W.: Presentation: „*Open Innovation Test bed LightCoce - Project Overview and Brick Pilot Line at University of Applied sciences Nuremberg*“, Online Event BUILDING THE FUTURE 2020 - Boosting innovation in the construction industry, INNOVIP, Bavarian Research Alliance, 15.07.2020, Munich.
- [13] Allar, C., Oeder, K. und Krcmar, W.: Presentation: „*Energy efficient building materials*“; EU-Project „*Light Coce - Building an Ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures*“, Project-Number: 814632 – Horizon 2020, 3rd Plenary Meeting, 30.06.2020/01.07.2020, THN/EnCN, Nuremberg.
- [14] Allar, C., Oeder, K. und Krcmar, W.: Presentation: „*Collaboration Management*“; EU-Project „*Light Coce - Building an Ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures*“, Project-Number: 814632 – Horizon 2020, 1st International Workshop, 17.11.2020, THN/EnCN, Nuremberg.
- [15] Allar, C., Oeder, K. und Krcmar, W.: Presentation: „*Energy efficient building materials*“; EU-Project „*Light Coce - Building an Ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures*“, Project-Number: 814632 – Horizon 2020, 4th Plenary Meeting, 18.01.2020/19.01.2020, THN/EnCN, Nuremberg.
- [16] Oeder, K. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Vorstellung der Ziele im EU-Projekt „LightCoce“*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [17] Allar, C. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Synthese von faserverstärkten Silica-Aerogel-Monolithen*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [18] Karsdorf, R. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Schallstopper-Technologie - Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.

- [19] Sappa, D. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Untersuchung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von schallschutztechnisch optimierten Ziegelgeometrien mittels FEM-Simulation und 3D-Druck*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [20] Kugler, F. und Krcmar, W.: Vortrag: „*Entwicklung geopolymerbasierter klimafreundlicher Baustoffe*“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [21] S. Bordin; M. Braun. Fassade³ – Entwicklung einer OPV-Fassade – Aufbau eines Mock-up. EnCN Jahreskonferenz 2020, Nürnberg, 10.12.2020.
- [22] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „*Investigation of the Operating Point Dependent Vsec-Product of DC/DC Converters for a Wide Input Voltage Range*“, PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management.
- [23] L. Rabenstein, A. Dietz, A. Kremser, N. Parspour: „*Semi-Analytical Calculation of a Laminated Transverse Flux Machine*“, 24th International Conference on Electrical Machines ICEM 2020.
- [24] J. Germishuizen, A. Kremser: „*Algebraic Design of Symmetrical Windings for AC Machines*“, 24th International Conference on Electrical Machines ICEM 2020.
- [25] R. Steckel, A. Kremser, H.-G. Herzog: „*Analysis of Dual Three-Phase Induction Machines under Post-Fault Operating Conditions*“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [26] A. Dietz, M. Caruso, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, C. Nevoloso: „*Enhanced Mathematical Modelling of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Considering Saturation, Cross-Coupling and Spatial Harmonics effects*“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [27] M. Schier, F. Epple, A. Maaoui, M. Schwellinger, M. Weber, A. Dietz, R. Zimmermann: „*Development of a Two In One Motor System as a new Vehicle Energy Concept for Next Generation Car*“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [28] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „*Design of a Wide Input Voltage Range Current-Fed DC/DC Converter Within a Reduced Duty-Cycle Range*“, 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe) 2020.
- [29] S. Wendel, P. Karamanakos, A. Dietz, R. Kennel: „*Flux Linkage-Based Model Predictive Current Control for Nonlinear PMSM Drives*“, 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES), IECON 2020.
- [30] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „*Reconfigurable Transformer for Wide Input Voltage Range DC/DC Converters*“, 9th Power Electronics and Motion Control (IPEMC), International Conference 2020.
- [31] A. Dietz: „*Trends in Electric Machine Design*“, EDPC 2020.
- [32] R. Rabenstein: „*Design of a Wound Field Transverse Flux Machine using Soft Magnetic Composite Claw-Poles*“, EDPC 2020.
- [33] T. Schindler: „*Real-Time Inference of Neural Networks on FPGAs for Motor Control Applications*“, EDPC 2020.
- [34] A. Dietz: „*Trends in Motor Production Processes*“, EDPC 2020.
- [35] T. Schindler: „*KI-Power: Development of a Powerful Real-Time Computation Platform*“, EnCN-Jahreskonferenz 2020.
- [36] R. Steckel: „*Energieeffiziente, elektrische Antriebe mit mehreren Sub-Wicklungssystemen*“, EnCN-Jahreskonferenz 2020.
- [37] N. Adamchuk: „*Aufbau einer durchgängigen numerischen Prozesskette in der Gussindustrie.*“, EnCN Jahreskonferenz, 2020.
- [38] J. Dettelbacher: „*Simulationsgestützte Optimierung des Materialflusses in einem Aluminium-Gussbetrieb.*“ 25. Symposium Simulationstechnik– ASIM 2020, 2020.
- [39] W. Schlüter: „*Simulationsbasierte Dimensionierung von Regeneratoren für eine volatile Hochtemperatur-Abwärmeverstromung.*“, 25. Symposium Simulationstechnik– ASIM 2020, 2020.
- [40] W. Schlüter: „*Mit Innovation zu mehr Effizienz in der Gussindustrie.*“, EnCN Jahreskonferenz, 2020.
- [41] W. Schlüter: „*Möglichkeiten der Abwärmeverstromung im Aluminium-Schmelzbetrieb.*“, Sitzung des Fachausschusses Leichtmetall-, Sand- und Kokillenguss des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie, Badeckenstedt, 2020.
- [42] W. Schlüter: „*Abwärmeverstromung im Aluminium-Schmelzbetrieb.*“, Plenarsitzung des Fachausschusses Druckguss des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie, Nürnberg, 2020.
- [43] D. Wagner: „*Optimization of Operational Parameters in Biogas Plants using the Anaerobic Digestion Model Number 1 (ADM1).*“, 25. Symposium Simulationstechnik– ASIM 2020, 2020.
- [44] WIP; Work in Progress!
- [45] G. Grün, H. Will: Energieeffiziente Modernisierung & Serielles Sanieren, Berliner Energietage 2020 – Digitaler Sommer der Energiewende, 26.5.2020

7 Veröffentlichungen 2020

- [1] Hildebrand, J.S., Seibold, J., Hertlein, K., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Einfluss der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik“; Publikation eingereicht bei Fachzeitschrift: „Ziegelindustrie International, Bauverlag“ (A).
- [2] Datsyuk, V., Trotsenko, S., Höflich, K., Kebelmann, K., Wedel, N., Allar, C., Deinhart, V., Schartel, B., Reich, S. und Krcmar, W.: „Sustainable Nanofiber Building Insulation Materials“, Publikation eingereicht bei Advanced Materials Technologies, Verlag Wiley (A).
- [3] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: „NanoFIM – Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude – Herstellung, Ausrüstung und Charakterisierung von Massivwandbau und Dämmstoffen mit Nanofaser-Isolationsmaterialien“; PTJ-FKZ: 03SF0543B, 3. Zwischenbericht, 30.04.2020 (A).
- [4] Sappa, D., Karsdorf, R., Öder, K., Kugler, F. und Krcmar, W.: „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“, PTK-FKZ: 03ET1526A, 2. Zwischenbericht, 30.04.2020 (A).
- [5] Kugler, F.; Betzold, C., Braun, M., Dentel, A., Kießling, G. und Krcmar, W.: „Herzo Opt - Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“, 3. Zwischenbericht, FKZ 03ET1641A, 30.06.2020, Technische Hochschule Nürnberg/EnCN (A).
- [6] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: „NanoFIM – Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude – Herstellung, Ausrüstung und Charakterisierung von Massivwandbau und Dämmstoffen mit Nanofaser-Isolationsmaterialien“; PTJ-FKZ: 03SF0543B, Abschlussbericht, 30.09.2020 (A).
- [7] S. Hummel; C. Betzold; K. Kandasamy; S. Bordin; G. Harhausen; A. Dentel.: „Experimentelle Validierung von Simulationsmodellen an einem Hardware-in-the-Loop Wärmepumpenprüfstand.“, The 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, Graz, Austria, 2020.
- [8] C. Betzold; S. Bordin; A. Dentel.: „Entwicklung und Implementierung von Betriebsführungsstrategien in einem Plusenergiegebäude.“, The 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, Graz, Austria, 2020.
- [9] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „Investigation of the Operating Point Dependent Vsec-Product of DC/DC Converters for a Wide Input Voltage Range“, PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management.
- [10] L. Rabenstein, A. Dietz, A. Kremser, N. Parspour: „Semi-Analytical Calculation of a Laminated Transverse Flux Machine“, 24th International Conference on Electrical Machines ICEM 2020.
- [11] J. Germishuizen, A. Kremser: „Algebraic Design of Symmetrical Windings for AC Machines“, 24th International Conference on Electrical Machines ICEM 2020.
- [12] R. Steckel, A. Kremser, H.-G. Herzog: „Analysis of Dual Three-Phase Induction Machines under Post-Fault Operating Conditions“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [13] A. Dietz, M. Caruso, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, C. Nevoloso: „Enhanced Mathematical Modelling of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Considering Saturation, Cross-Coupling and Spatial Harmonics effects“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [14] M. Schier, F. Epple, A. Maaoui, M. Schwellinger, M. Weber, A. Dietz, R. Zimmermann: „Development of a Two In One Motor System as a new Vehicle Energy Concept for Next Generation Car“, 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2020.
- [15] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „Design of a Wide Input Voltage Range Current-Fed DC/DC Converter Within a Reduced Duty-Cycle Range“, 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe) 2020.
- [16] S. Wendel, P. Karamanakos, A. Dietz, R. Kennel: „Flux Linkage-Based Model Predictive Current Control for Nonlinear PMSM Drives“, 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES), IECON 2020.
- [17] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz: „Reconfigurable Transformer for Wide Input Voltage Range DC/DC Converters“, 9th Power Electronics and Motion Control (IPEMC), International Conference.
- [18] N. Adamchuk: „Durchgängige numerische Auslegung von Bauteilen in der Gießerei-Industrie (DNaguss).“, Giesserei Special, 48, 02/2020.
- [19] D. Broszeit; W. Schlüter: „Virtual Commissioning with Siemens Mechatronic Concept Designer.“, ARC 2020. Applied Research Conference 2020, 2020 (C).
- [20] J. Dettelbacher; W. Schlüter: „Transparenter Betrieb durch digitales Produktionsabbild.“, Giesserei, 11, 34–37, 2020 (B).

- [21] J. Dettelbacher; W. Schlüter: „*Simulationsgestützte Optimierung des Materialflusses in einem Aluminium-Gussbetrieb.*“, ARGESIM Report, 59, 343–348, 2020 (B).
- [22] J. Dettelbacher; W. Schlüter: „*Simulative Study of Aluminium Die Casting Operations Using Models with Varying Degrees of Detail.*“, Simulation Notes Europe, 30, 183–188, 2020 (A).
- [23] W. Schlüter; J. Hanna; K. Zacharias: „*Simulationsbasierte Dimensionierung von Regeneratoren für eine volatile Hochtemperatur-Abwärmeverstromung.*“, ARGESIM Report, 59, 281-288, 2020 (B).
- [24] D. Wagner; W. Schlüter: „*Optimization of Operational Parameters in Biogas Plants using the Anaerobic Digestion Model Number 1 (ADM1).*“, Simulation Notes Europe, 30, 11–14, 2020 (A).
- [25] D. Wagner; W. Schlüter: „*Vorhersage und Regelung der Methanproduktion durch maschinelles Lernen.*“, ARGESIM Report, 59, 159–166, 2020 (B).

Anmerkungen und Hinweise: Aufgrund des Ausbruchs der SARS-CoV-2-Pandemie am Anfang des Jahres 2020 sind einige bzw. viele wissenschaftliche Veröffentlichungen entweder komplett abgesagt oder in die anderen Quartale II, III oder IV verschoben worden. Aus diesen Gründen sind auch die Vorträge und Poster relativ rar. Die Vorstellung der wissenschaftlichen Veröffentlichungen auf den Konferenzen fand dabei ausschließlich online statt.

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 / 56854 9310

Web
www.encn.de/EMT

Lehrstuhl für Leistungselektronik

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Lehrstuhl für Leistungselektronik der FAU	CONNECT (EU/BMBF), NENUFAR (EU)

Projektbericht 2020

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik (LEE) wurde im September 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. Leistungselektronik ist die Grundvoraussetzung für eine intelligente und effiziente 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 neuartige Integrationstechnologien bis hin zu Fragen der Lebensdauer und Verfügbarkeit, der Netzstabilität und Schutztechnik. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung fallen der Leistungselektronik zunehmend auch Aufgabe der Anlagen-, Netz- und Prozessüberwachung zu. Auch hierfür werden innovative Lösungsansätze wissenschaftlich untersucht.

Der Lehrstuhl LEE kooperiert sehr eng mit dem Fraunhofer-IISB, das ebenfalls mit einer Arbeitsgruppe am Energie Campus Nürnberg vertreten ist. Gemeinsam bilden Sie den Kern des Forschungsbereichs Energiemanagement-Technologien (EMT) am EnCN. Das IISB betreibt am Hauptsitz in Erlangen ein energietechnisches Reallabor in der Dimension eines kleineren Industrieunternehmens. Die Bereitstellung von Kälte und Wärme, von Druckluft, Vakuum und Reinstwasser ist dabei eng gekoppelt mit regenerativer Stromerzeugung aus PV, mit einem Blockheizkraftwerk und dem Einsatz unterschiedlichster Speichertechnologien (Li-Ion, Redox-Flow und LOHC). Mit dieser komplexen Infrastruktur steht auch den Partnern am EnCN ein Applikationslabor für innovative Energiemanagement-Technologien zur Verfügung. Eine mächtige Realdatenbank erlaubt für Forschungszwecke Zugriff auf rund einhundert Messparameter mit zum Teil mehrjähriger Historie. Das umfassende Energiemonitoring, die Einbeziehung von Wetterdaten sowie hoch entwickelte Algorithmen unter Einsatz künstlicher Intelligenz erlauben eine Betriebsoptimierung der Gesamtinfrastruktur.

Darüber hinaus kooperiert der Forschungsbereich Energiemanagement-Technologien des EnCN sehr eng mit dem Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE), einer Initiative der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der beiden Fraunhofer Institute IIS und IISB sowie mit dem bayerischen Cluster Leistungselektronik und - auch im Rahmen kooperativer Promotionen – mit den Hochschulen Nürnberg (GSO) und Coburg.

KONTAKT

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



E-Mail
martin.maerz@fau.de

Telefon
+49 911 / 568554 – 9310

Web
www.lee.tf.fau.de



Abbildung 1: Teamarbeit bei der Umsetzung von Projekten

Bereits im Januar 2018 startete am Lehrstuhl LEE das Projekt NENUFAR (Next gEneration of eNErgy storagE solUtions For more electricAI aiRcrafts). NENUFAR ist Teil des Clean Sky Programms der EU, dem größten europäischen Forschungsprogramm zur Entwicklung innovativer Spitzentechnologien zur Reduzierung von CO₂- und Lärmemissionen von Flugzeugen. Clean Sky wird im Rahmen des EU-Programms Horizont 2020 mit einem Budget von 4 Mrd. Euro gefördert und umfasst 600 teilnehmende Einrichtungen aus 24 Ländern, darunter die FAU mit dem Lehrstuhl LEE.

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. Das Projektziel von NENUFAR ist die Entwicklung einer innovativen Energiespeicherlösung für LVDC- und HVDC-Stromnetze in Flugzeugen. Sicherheit, Robustheit, Verfügbarkeit, Lebensdauer, Gewicht und Kompaktheit sind dabei die Hauptanforderungen. Daran arbeitet ein internationales interdisziplinäres Expertenkonsortium, darunter Mitarbeiter des Lehrstuhls LEE. Deren Aufgabe ist es, unter Berücksichtigung einschlägiger Luftfahrtnormen, ein hochzuverlässiges Batterie-Management-System (BMS) sowie innovative leistungselektronische Wandler für das Energiemanagement an Bord zu entwickeln.

Das EU-Projekt CONNECT des Lehrstuhls LEE gemeinsam mit der RWTH Aachen, der Infineon AG und weiteren Partnern konnte in 2020 erfolgreich abgeschlossen werden. Ziel war die Entwicklung innovativer Gleichspannungswandler mit sehr hoher Energieeffizienz sowie die Entwicklung neuartiger, in Leistungselektronik integrierbarer Schutz- und Überwachungsfunktionen für Batteriesysteme.

Darauf aufbauend konnte in 2020 das EU Projekt PROGRESSUS am Lehrstuhl gestartet werden. Mit 22 Partner aus 5 Ländern (Deutschland, Italien, Niederlande, Spanien und Slowakei) erforscht PROGRESSUS wie die Klimaschutzziele 2030 durch konkrete Anwendungsszenarien erreicht werden können. Im deutschen Konsortium arbeiten Partner aus Industrie und Forschung gemeinsam an Ladesäulen mit integrierten Speicherbatterien, die zu einem Mikronetz (Micro Grid) zusammengeschlossen werden und mit dem Stromnetz verbunden sind. Dabei sind Hardware- und Systemsicherheit des Micro Grids ein zentraler Bestandteil des deutschen Forschungsschwerpunktes.

Das Lehrangebot des Lehrstuhls umfasst aktuell die Vorlesungen

- Leistungselektronik - Grundlagenvorlesung
- Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang
- Leistungselektronik für dezentrale Energieversorgung – Gleichspannungsnetze
- Thermisches Management in der Leistungselektronik
- Elektrische Energiespeichersysteme,

zudem Praktika und Seminare. Das Lehrangebot richtet sich in erster Linie an Studierende der Studienrichtungen „Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik“ (EEI), Energietechnik, Mechatronik und WING-ET.

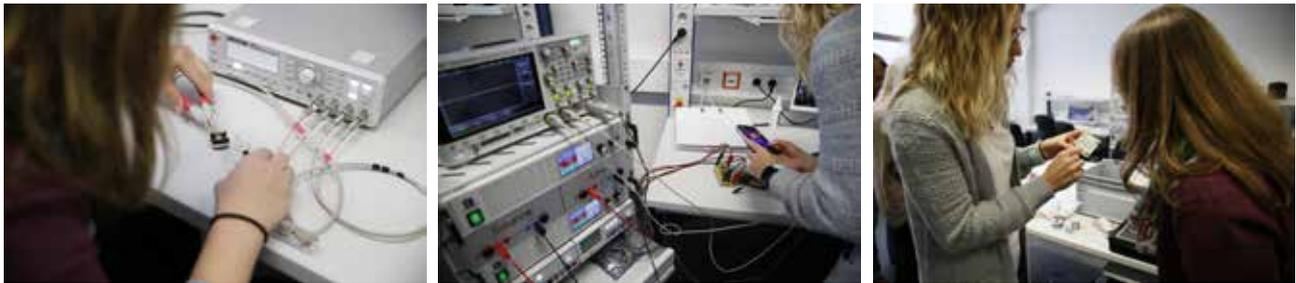


Abbildung 2: Praktisches Arbeiten am Lehrstuhl LEE

In 2020 wurden über den Lehrstuhl LEE 36 studentische Abschlussarbeiten betreut. Die Masterarbeit von Frau Riccarda von der Marwitz mit dem Titel „Isolationssysteme für Leistungselektronik in Luftfahrtanwendungen“ erhielt den EnCN-Energiepreis 2020 in der Kategorie Energiemanagement-Technologien, Herr Adrian Amler wurde für seine Bachelorarbeit mit dem Titel „Serieller Datenbus für die Leistungselektronik – Medium Access Control“ der VDE Bayern Award 2020 verliehen und Herr Lars Keller erhielt für seinen herausragenden Master-Abschluss im Studiengang Mechatronik den Studienpreis der Baumüller-Gruppe. Seine Masterarbeit mit dem Titel „Erarbeitung und Bewertung von Konzepten für das galvanisch gekoppelte Laden von Nutzfahrzeugen“ schrieb Herr Keller am Lehrstuhl LEE in Kooperation mit der Daimler Truck AG.



Abbildung 3: Dr. Bernd Eckardt und Dr. Stefan Matlok – die Gewinner des renommierten und mit 50.000 Euro dotierten **Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2020**. Herr Dr. Eckardt (links) ist Lehrbeauftragter am LEE zum Thema „Elektrische Energiespeichersysteme“, Herr Dr. Matlok (rechts) hat im September 2020 unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Martin März seine Promotion zum Thema „Digitale Regelung bidirektionaler Gleichspannungswandler“ mit Auszeichnung abgeschlossen.

Vorträge 2020

- [1] Lukaschik A.: *MVDC in Verteilnetzen - Bericht aus der JWG C6/B4.37*, Vortragsreihe TU Ilmenau, 13.01.2020
- [2] März M.: *Future Trends in Power Electronics. Workshop on »Future Role of Power Electronics and Drive Systems« at ETH-Zurich*, 29.01.2020

Veröffentlichungen 2020

- [1] Gerstner M., Dietz A., März M.: *Design of a Wide Input Voltage Range Current-Fed DC/DC Converter Within a Reduced Duty-Cycle Range*. 22nd European Conference on Power Electronics and Applications. 7-11 September 2020, Lyon (France)
- [2] M. Schmidhuber, C. Drexler, S. Ditze, C. Joffe, S. Ehrlich, B. Arndt, P. Olbrich, H. Reindl: *Design and integration of inductive components for a high-frequency 11 kW / 800 V off-board charger for electric vehicles*. 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, Germany, 2020
- [3] M. Schulz, N. Schleippmann, K. Gosses, R. Chacon, B. Wunder, M. März: *Four Switch Buck/Boost Converter to Handle Bidirectional Power Flow in DC Subgrids*. Proceedings Int. Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), Nuremberg, 2020
- [4] S. Waldhör, S. Bockrath, M. Wenger, R. Schwarz, V.R.H. Lorentz: *foxBMS - free and open BMS platform focused on functional safety and AI*. Proceedings Int. Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM), 2020
- [5] S. Ehrlich, A. Rossmannith, M. Sauer, C. Joffe, M. Maerz: *Fast Numerical Power Loss Calculation for High Frequency Litz Wires*. IEEE Transactions on Power Electronics, July 2020, DOI: 10.1109/TPEL.2020.3008564
- [6] M. Gerstner, Dietz A., M. Maerz: *Reconfigurable Transformer for Wide Input Voltage Range DC/DC Converters*. IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)
- [7] Schellenberger M., Roeder G., Liu X., Hilpert F., Hofmann M., März M.: *Cognitive Power Electronics for Intelligent Drive Technology*. Electric Drives Production Conference (E|DPC), Ludwigsburg, 2020
- [8] Lange C., Rueß A., Nuß A., Oechsner R., Maerz M.: *Dimensioning battery energy storage systems for peak shaving based on a real-time control algorithm*. Applied Energy 280(7):115993 DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115993
- [9] Schiedermeier M., Rettner C., Steiner M., März M.: *Dual-inverter control synchronization strategy to minimize the DC-link capacitor current*. IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference (IEEE VPPC 2020)
- [10] Apelsmeier A., Rettner C., Maerz M.: *Model for Conducted Emission of SiC Power Modules for automotive traction Inverter - Comparison to behaviour-based Model*. IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Aalborg, Denmark, November 2020, DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265805
- [11] Zhao D., Letz S., Yu Z., Schletz A., März M.: *Combined experimental and numerical approach for investigating the mechanical degradation of the interface between thin film metallization and Si-substrate after temperature cycling test*. Microelectronics Reliability 114, DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113785
- [12] Yu Z., Weijian Z., Zhao D., Zheng Z., Bayer C., Schletz A., März M.: *Reliability of Silver Direct Bonding in Thermal Cycling Tests for 3D Power Integration*. 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC 2020), Norway
- [13] Apelsmeier A., Rettner C., Maerz M.: *Effect of voltage ringing in SiC Power Modules on conducted EMI of traction inverters*. PCIM Europe digital days 2020, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management
- [14] Yu Z., Weijian Z., Bayer C., Schletz A., März M.: *Application of response surface methodology for optimization of Ag-Ag Direct Bonding for Wafer-Level Power Electronics Packaging*. 11th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020
- [15] Rettner C., Schiedermeier M., Apelsmeier A., Heckel T., Diepgen A., Klische A., Dirksen D., Maerz M.: *SiC Power Module with integrated RC-Snubber Design for Voltage Overshoot and Power Loss Reduction*. 11th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020
- [16] Rettner C., Schiedermeier M., Apelsmeier A., Maerz M.: *Fast DC-Link Capacitor Design for Voltage Source Inverters Based on Weighted Total Harmonic Distortion*. 35th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC 2020), New Orleans, March 2020, DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124581

- [17] Zimmermann V., Zörner A., Weiyi C., Yu Z., Jank M.P.M., Bayer C., Schletz A., Maerz M.: *Integration of Printed Electronics with Potted Power Electronic Modules*. 11th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020

Patente 2020

- [1] US 10,763,595 B1: Electrical bridging device for bridging electrical components in particular an energy source or an energy consumer

Promotionen 2020

- [1] Jens Schmenger: *Ein Beitrag zu modularen und hochkompakten isolierenden Schnellladegeräten für Elektrofahrzeuge*.
- [2] Ajay Poonjal Pai: *Impact of Silicon Carbide based Power Modules on Mission Profile Efficiency of Automotive Traction Inverters*.
- [3] Patrick Hofstetter: *Hochausnutzung von Siliziumkarbid-Feldeffekttransistoren in Traktionsumrichtern*
- [4] Matlok Stefan: *Digitale Regelung bidirektionaler Gleichspannungswandler*

Abschlussarbeiten 2020

- [1] Schramm, Simon: *Entwicklung des Energiemanagements für ein flexibles Energiespeichernetzwerk*
- [2] Tao, Zhenyu: *Investigation of Ceramic Embedding Technologies for High Temperature Power Electronics*
- [3] Leser, Felix: *Entwicklung, Parametrierung und Validierung eines Simulationsmodells zur Zwischenkreisauslegung und Bestimmung der systemwirkungsgradoptimalen Umrichterschaltfrequenz*
- [4] Retschkowski, Moritz: *Entwicklung des Sicherheitskonzeptes einer Automatisierungszelle für eine Industrieanlage im Betrieb mit Gleichstrom*
- [5] Gutwald, Benjamin: *Entwicklung eines Energie-Messkonzeptes zur Validierung der virtuellen Inbetriebnahme einer Industrieanlage, die mit Gleichstrom betrieben wird*
- [6] Schröder, Jacqueline: *Wirtschaftliche Analyse der Einsatzpotentiale eines Energieknotens im DC-Netz am Beispiel des DC-Grid Managers*
- [7] Zöllner, Moritz: *Entwicklung eines modularen, elektrischen Energiespeichersystems für unbemannte Luftfahrzeuge*
- [8] Uzun, Adem: *EMV-optimierte Raumzeigermodulation für eine 6-phasige Maschine*
- [9] Martin, Julian: *Konzeptstudie für ein CO₂-neutrales Energiesystem im ländlichen Raum*
- [10] Mu, Fan: *End-of-Line Geräuschprüfstand*
- [11] Halmos, Felix: *Multiphysikalische Simulation von Leistungsmodulen unter Feuchtigkeitseintrag*
- [12] Mohadeseh Jahani, Mina: *Untersuchung von Treiberschaltungen für SiC-Leistungshalbleiter*
- [13] Bayrakdar, Melih: *Drehmomentregelung eines elektrischen Achssystems zur Schwingungsdämpfung im mechanischen Antriebsstrang*
- [14] Bengl, Anthea: *Direktgekühlte elektrische Traktionsmaschine*
- [15] Strobel, Johannes: *Echtzeitüberwachung von leistungselektronischen Systemen mit Hilfe von neuromorphen integrierten Schaltungen*
- [16] Zhou, Yan: *Entwicklung einer weich schaltenden Umricherzelle und deren Integration in Multilevel-Topologien unter Berücksichtigung von Si / SiC Mischbestückung*
- [17] Keller, Lars: *Erarbeitung und Bewertung von Konzepten für das galvanisch gekoppelte Laden von Nutzfahrzeugen*
- [18] Gehring, Johannes: *Entwicklung und Charakterisierung einer Dual-Active-Bridge mit GaN-Transistoren*
- [19] Hir Safavi, Masoud: *Entwicklung eines Halbleiterschalters für das Schalten hoher Gleichspannungen*
- [20] Farnbacher, Lukas: *Entwicklung einer Schaltung zum zyklischen Umladen von Kondensatoren für Lebensdauertests*
- [21] Polster, Thomas: *Optimierung der Leiterführung eines breitbandigen AMR Stromsensors*
- [22] Sporer, Anna: *Simulation und Charakterisierung magnetischer Streufelder für ein induktives Ladesystem mit geringem Spulenabstand*

- [23] Abbasi, Mohammad: *Entwicklung und Bewertung von Betriebsstrategien zur Synchronisierung von automobilen Traktionsumrichtern*
- [24] Sodaigui, Wafaa: *Entwicklung eines Spice-Modells für Photovoltaikzellen zur Simulation der Verschattungsproblematik*
- [25] Best, Lukas: *Untersuchungen zum Einsatz von Nickel-Zink-Ferriten in Spannungswandlern mit hohen Schaltfrequenzen*
- [26] Utzelmann, Samuel: *Analyse eines für hohe Schaltfrequenzen konzipierten isolierenden Gleichspannungswandlers*
- [27] Fella, Matthias: *Entwicklung einer zur Vielfach-Parallelschaltung von GaN-Transistoren geeigneten Halbbrückenschaltzelle*
- [28] Schlachter, Marvin: *Simulation, Untersuchung und Kompensation der Drehmomentenvarianz zwischen den Rädern einer heckangetriebenen Twin-Achse*
- [29] Li, Jiayu: *Inbetriebnahme und Bewertung einer modellprädiktiven Regelung für einen Dual-Active-Bridge-Converter auf Basis einer Lookup-Table Methode*
- [30] Manuel Laugner: *Untersuchung eines Resonanzwandlers in seinem lastunabhängigen Betriebspunkt*
- [31] Wagner, David: *Evaluierung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Systems für einen Leistungsbereich um 25 kW*
- [32] Sauer, Marco: *Untersuchung eines Transformators in planarer Bauweise am Beispiel eines resonanten Konverters*
- [33] Farnbacher, Lukas: *Entwicklung einer Schaltung zum zyklischen Umladen von Kondensatoren für Lebensdauertests*
- [34] Sporer, Anna: *Simulation und Charakterisierung magnetischer Streufelder für ein induktives Ladesystem mit geringem Spulenabstand*
- [35] Polster, Thomas: *Optimierung der Leiterführung eines breitbandigen AMR Stromsensors*
- [36] Maunz, Ludwig: *Inbetriebnahme und Charakterisierung des Interleaved-Betriebs von Dual-Active-Bridge-Konvertern*

W1-Professur „Energieinformatik“

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU - Department Informatik (INF) Lehrstuhl für Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme)	./.

1 W1-Professur „Energieinformatik“

Die Besetzung der W1-Professur für Energieinformatik erfolgte im April 2016 durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner. Im Jahr 2020 wurde die Bearbeitung von Projekten in den Forschungsschwerpunkten Energiesystemanalyse, Netzintegration Elektromobilität und der Steuerung von intelligenten Energiesystemen mittels Methoden des Maschinellen Lernens fortgeführt.

1.1 Energiesystemanalyse

Im Bereich Energiesystemanalyse wurde Anfang 2020 der Abschlussbericht für das BMWi-geförderte Projekt „KOSiNeK - Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext“ angefertigt. Darüber hinaus wurden weitere Szenarien mit aktualisierten Eingabeparametern simuliert und ausgewertet. In allen betrachteten Szenarien zeigt sich, dass Deutschland von einem Stromexportland zu einem Stromimporteurland im Jahr 2030 werden wird. Außerdem verstärkt sich der Effekt einer zunehmend negativen Residuallast. Als Fortführung des Projekts KOSiNeK wurde mit mehreren Partnern an einer Projektskizze zum Thema Sektorkopplung gearbeitet, welche im Forschungsschwerpunkt Energiesystemanalyse des 7. Energieforschungsprogramms im Herbst 2020 eingereicht wurde.

In einer internationalen Kollaboration mit der University of Calgary und dem Canadian Energy Research Institute konnte eine ältere Version des Energiesystemanalysemodells erfolgreich auf das Energiesystem der kanadischen Provinz Alberta angepasst werden. Zusätzlich wurde eine weitere Komponente für die Modellierung der Nachfrage von Elektrofahrzeugen implementiert, um Aussagen zu den Auswirkungen einer großen Anzahl von Elektrofahrzeugen auf die Energieerzeugung und Treibhausgasemissionen in Alberta zu tätigen. Die Arbeit wurde im Journal Applied Energy publiziert [1].

1.2 Netzintegration Elektromobilität

Im Forschungsbereich Netzintegration Elektromobilität konnten im Jahr 2020 zahlreiche wissenschaftliche Projekte durchgeführt werden. Die Kooperation mit der UC Berkeley konnte weiter vertieft werden. Herr Pruckner war im März 2020 an der UC Berkeley zu Gast. Dabei entstand eine wissenschaftliche Publikation zu den Auswirkungen der Elektromobilität auf das kalifornische Energiesystem. Im betrachteten Modell wurden datengetriebene Ansätze zur Verschiebung von Ladevorgängen evaluiert. Dabei wurden sowohl zeitliche als auch räumliche Aspekte berücksichtigt [2].

Aufgrund der zunehmenden fluktuierenden Stromerzeugung wird die Bereitstellung von Flexibilität und Systemdienstleistungen immer wichtiger. Deshalb wurde in einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit die Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge analysiert und bewertet. Für die Beschreibung der Verfügbarkeit von Flexibilität wurde hierfür ein Formalismus entwickelt und im Rahmen der Konferenz ACM e-Energy vorgestellt [3].

KONTAKT

Prof. Dr. Marco Pruckner

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
marco.pruckner@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 27697

Web
www.encn.de

Ergänzt wurden die Tätigkeiten im Bereich der Netzintegration von Elektrofahrzeugen durch datengetriebene Ansätze. Beispielsweise wurden Datenquellen zu Ladevorgängen im öffentlichen Raum verwendet, um das Nutzerverhalten, die Bereitstellung von Flexibilität und mögliche Prognoseverfahren näher zu analysieren. Hierbei zeigen sich vielversprechende Ansätze, um den Nutzerkomfort bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten zu verbessern [7].

Neue Mobilitätskonzepte werden ebenfalls immer wichtiger. Deshalb wurden in einer weiteren wissenschaftlichen Publikation die Anwendungsmöglichkeiten und Herausforderungen von Shared Autonomous Electric Vehicles an der Schnittstelle von Mobilitäts- und Energiesystemen näher beleuchtet. Hierbei zeigen sich zahlreiche interessante Anwendungsmöglichkeiten gerade im Bereich der Flexibilisierung von Ladevorgängen und der Bereitstellung von Primärregelleistung dieser Fahrzeugflotten [5].

Einen weiteren wichtigen Aspekt der Elektromobilität stellt die Batteriemodellierung selbst dar. In einer externen Promotion wird ein digitales Abbild einer Batterie entwickelt, um eine effiziente und kostengünstige Analyse der Batteriealterung zu ermöglichen. Untersucht werden hierzu Neuronale Netze, welche in der Lage sind komplexe Zusammenhänge anhand großer Datenmengen selbstständig und automatisch zu erkennen [4],[6].

1.3 Steuerung intelligenter Energiesysteme

Im Projekt “Steuerung von Energiesystemen auf Basis selbstlernender Algorithmen” wurden im Jahr 2020 einige Anpassungen am Framework vorgenommen. Der Teil des Frameworks, der neuronale Netze umfasst, wurde von Keras auf Pytorch umgestellt. Außerdem wurden Interfaces geschaffen, die es erlauben externe Python-basierte state-of-the-art Algorithmen zum Anlernen der verteilten Prosumer zu verwenden. Im Rahmen dieser Änderung wurde auch die Dokumentation und somit Nutzerfreundlichkeit verbessert. Zusätzlich konnte in einer Projektarbeit der Grundstein für Hyperparameter-Analysen und verbesserte Parallelisierung der Rechenoperationen gelegt werden. Eine Abschlussarbeit im Projekt beschäftigte sich mit der Entwicklung einer intelligenten Ladesteuerung für eine skalierbare Elektroautoflotte und dem Vergleich mit optimierten Ladestrategien und unkontrolliertem Laden.

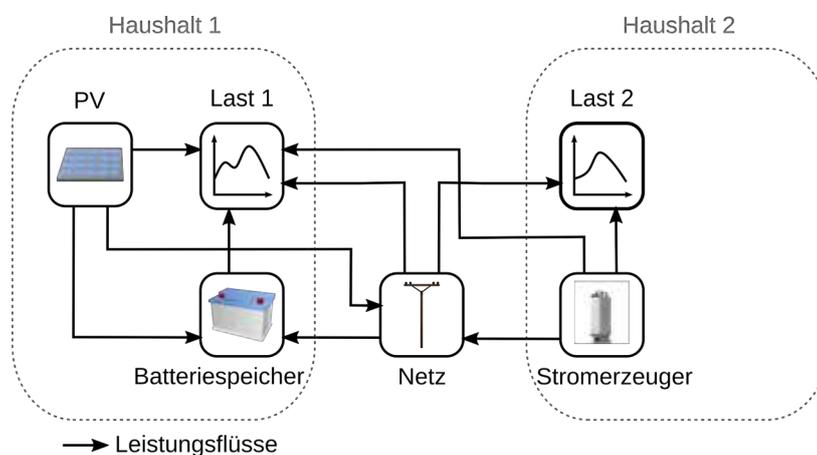


Abbildung 1: Übersicht des betrachteten Systems im Projekt “Steuerung von Energiesystemen auf Basis selbstlernender Algorithmen”

1.4 Nachwuchsförderung

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem Gebiet der Energieinformatik wird durch mittlerweile drei Lehrveranstaltungen sichergestellt. Im Wintersemester wird die Veranstaltung „Modellierung, Optimierung und Simulation von Energiesystemen“ durchgeführt. Im Sommersemester findet die Veranstaltung „Smart Grids und Elektromobilität“ statt. Zusätzlich wird ein Seminar Energieinformatik sowohl im Winter- als auch im Sommersemester angeboten. Inhaltlich werden hier aktuelle Veröffentlichungen im Bereich der Energieinformatik besprochen.

2 Veröffentlichungen 2020

- [1] G. Doluweera, F. Hahn, J. Bergerson, M. Pruckner: A Scenario-based Study on the Impacts of Electric Vehicles on Energy Consumption and Sustainability in Alberta, *Applied Energy* 268, 2020
- [2] E. Apostolaki-Iosifidou, S. Woo, M. Pruckner, T. Lipman: Electric Vehicle Charge Management for Lowering Costs and Environmental Impact, *IEEE SusTech 2020*, April 2020 (virtuell)
- [3] J. Schlund, M. Pruckner, R. German: FlexAbility - Modeling and Maximizing the Bidirectional Flexibility Availability of Unidirectional Charging of Large Pools of Electric Vehicles, *ACM e-Energy 2020*, Melbourne, Juni 2020
- [4] F. Heinrich, T. Lehmann, K. Jonas, M. Pruckner: Data Driven Approach for Battery State Estimation based on Neural Networks, 14. Tagung Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen, IAM Dresden (verschoben auf März 2021)
- [5] M. Pruckner, D. Eckhoff: Shared Autonomous Electric Vehicles and the Power Grid: Applications and Research Challenges, *IEEE ISGT Europe 2020*, TU Delft, Oktober 2020
- [6] F. Heinrich, M. Pruckner: Data-driven Approach for Battery Capacity Estimation Based on In-Vehicle Driving Data and Incremental Capacity Analysis, *International Conference on Applied Energy 2020*, Dezember 2020 (virtuell)
- [7] L. Strobel, J. Schlund, V. Brandmeier, M. Schreiber, M. Pruckner: Smart Charging and Renewable Grid Integration - a Case Study based on Real-Data of the Island of Porto Santo, *EAI Sustainable Energy for Smart Cities*, Dezember 2020 (virtuell)

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.encln.de/markt

ENERGIEMARKTDESIGN

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU LS für Wirtschaftstheorie - Prof. Dr. Veronika Grimm (Sprecherin) FAU LS für Wirtschaftstheorie - Dr. Jonas Egerer FAU LS für Steuerrecht und Öffentliches Recht - Prof. Dr. Roland Ismer FAU LS für Wirtschaftsmathematik - Prof. Dr. Frauke Liers FAU LS für Wirtschaftsmathematik - Prof. Dr. Alexander Martin FAU LS für Wirtschaftsmathematik - PD Dr. Lars Schewe (inzwischen University of Edinburgh School of Mathematics) FAU Professur für Volkswirtschaftslehre - Prof. Dr. Gregor Zöttl	TPJ1: Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten TPJ2: Ökonomische Analyse von Gasmärkten TPJ3: Geschäftsmodelle in Smart Grids

Projektbericht 2020

Im Projekt „Energiemarktdesign“ (EMD) des EnCN² befasst sich ein Team aus Ökonomen, Mathematikern und Juristen mit den wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Transformation des Energiesystems. Ziel ist es, Methoden der Energiemarktmodellierung und die notwendigen mathematischen Algorithmen zu entwickeln sowie mit fundierten Analysen zum energiepolitischen Diskurs in Deutschland und Europa beizutragen.

Im Bereich des **Strommarktes** liegen die Schwerpunkte insbesondere auf der Steuerungswirkung des Marktdesigns für privatwirtschaftliche Investitionen und dem regulierten Netzausbau. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Identifikation von zukunftsfähigen Rahmenbedingungen auf Verteilnetzebene, die Geschäftsmodelle regionaler Stakeholder und Flexibilitätsoptionen möglich machen. Für die Analyse komplexer ökonomischer Fragestellungen in Energiemarktmodellen werden mathematische Techniken erarbeitet, um die Lösbarkeit der betrachteten Modelle zu gewährleisten. Darüber hinaus werden auf Basis von Umfragen und Forschungsansätzen aus der Verhaltensökonomie individuelle Verhaltensmuster verschiedener Akteure identifiziert und auf dieser Grundlage Anreizsysteme hinsichtlich ihrer Wirkungen auf Entscheidungen an Energiemärkten untersucht. Besonderes Augenmerk gilt dabei dezentralen Ansätzen, die auch Geschäftsmodelle regionaler Akteure im urbanen und ländlichen Raum mitdenken. Im Bereich der **Gasmarktanalyse** werden mathematische Verfahren zur Betrachtung des europäischen Gasmarktes zur Anwendung gebracht, die im DFG Sonderforschungsbereich/Transregio (SFB TRR 154) zur mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken gemeinsam mit den im TRR 154 involvierten Wissenschaftlern entwickelt werden. Auf Basis der grundlegenden methodischen Resultate des TRR 154 sollen im EnCN² realitätsnahe Modelle kalibriert und analysiert werden. Langfristiges Ziel der Arbeitsgruppe ist es, in einer integrierten Betrachtung Änderungen am Strom- und Gasmarktdesign mit ihren Auswirkungen auf das künftige Energiesystem untersuchen zu können. Zentrale Fragen stellen sich im Kontext von sektorenspezifischen Steuern und Abgaben, von Power-to-Gas Technologien zur Speicherung überschüssiger erneuerbarer Stromerzeugung und mit der sektorenübergreifenden Planung von Investitionen in die Netzwerkinfrastruktur. Im Rahmen der Modellentwicklung zur Sektorenkopplung und der Erstellung detaillierter regionaler Datensätze des deutschen Stromsystems erfolgt insgesamt eine engere Verzahnung der Teilprojekte des Projekts Energiemarktdesign, wodurch zukünftig immer wichtiger werdende Forschungsfragen zu integrierten Energiemärkten (Strom, (Erd-)gas und Wasserstoff) mit mehrstufigen Marktmodellen adressiert werden können. Im Bereich **Mobilität** wird die Interdependenz von nachhaltiger Mobilität mit dem Stromsektor analysiert. Dabei liegt das Augenmerk auf der batterieelektrischen Mobilität sowie (in Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B) auf

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATORIN

Prof. Dr. Veronika Grimm

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail

Veronika.Grimm@encn.de

Telefon

+49 911 / 5302 224

Web

www.encn.de

der Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzellen und anderen nachhaltigen Kraftstoffen. Durch dieses Themenspektrum werden zunehmend die Voraussetzungen geschaffen, auch Schlüsselfragen der Sektorenkopplung inklusive der Abbildung von Mobilität zu adressieren. Dies eröffnet einen neuen Blick sowohl auf die Transformation des deutschen Energiesystems als Teil des europäischen Binnenmarkts und des weltweiten Energiemarktes sowie auf dezentrale Energiemärkte an der Schnittstelle zu innovativen Konzepten in der Mobilität und in der Wärmeversorgung.

Im Rahmen des Projekts Energiemarktdesign im EnCN² wurden zu diesen Forschungsfragen im Jahr 2020 etwa 30 wissenschaftliche Arbeiten in hochrangigen internationalen Zeitschriften publiziert oder als Preprint fertiggestellt. Es konnten auch dieses Jahr kompetitive Fördergelder, etwa von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) oder auch im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), eingeworben werden. Prof. Dr. Veronika Grimm wurde im Jahr 2020 in den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung berufen und ist darüber hinaus Mitglied in renommierten Beratungsgremien beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), beim Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) sowie beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Prof. Dr. Alexander Martin ist seit 2019 Mitglied der Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS). Die umfangreichen Aktivitäten zum Thema Wasserstoffwirtschaft und Sektorenkopplung zwischen den EnCN-Forschungsbereichen Energiemarktdesign und Speicher führten im September 2019 zur Gründung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). Das Zentrum ist am EnCN angesiedelt und entwickelt unter der Leitung von Prof. Dr. Veronika Grimm und Prof. Dr. Peter Wasserscheid zusammen mit einem Bündnis führender bayerischer Industrieunternehmen, mittelständischen Unternehmen und Verbänden („Wasserstoffbündnis Bayern“) die Grundlage für eine Wasserstoffstrategie der Bayerischen Staatsregierung. Die Bayerische Wasserstoffstrategie wurde im Mai 2020 vorgestellt, im November 2020 fand in Kooperation mit der Messe Nürnberg der Hydrogen Dialogue statt. Mit den Aktivitäten des H2.B erhalten auch die Kontakte der Wissenschaftler zur bayerischen Wirtschaft eine neue Qualität in einem hochdynamischen Themenfeld. Zu diesen Themen sind im Bereich EMD in Zusammenarbeit mit Unternehmen erste gemeinsame Industrieprojekte gestartet, bzw. befinden sich derzeit in der Konzeptionsphase.

Im Jahr 2020 haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus EMD zahlreiche Gutachten und Stellungnahmen vorgelegt. Zu nennen sind das Konjunkturupdate 2020 [G1] sowie das Jahresgutachten 2020/21 [G2] des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung unter Beteiligung von Prof. Dr. Veronika Grimm. Prof. Dr. Roland Ismer hat an einem Beratungsmandat für die Europäische Union für die Ausgestaltung von CO₂-Grenzausgleichsmaßnahmen mitgewirkt [G3]. Die Expertenkommission zum Monitoringprozess „Energie der Zukunft“ hat unter Beteiligung von Prof. Dr. Veronika Grimm sowie Dr. Christian Sölch und Sandra Kretschmer eine Stellungnahme mit dem Titel „Klimaschutz vorantreiben, Wohlstand stärken – Kommentierung zentraler Handlungsfelder der deutschen Energiewende im europäischen Kontext“ herausgegeben [G4]. Darüber hinaus wurden ein Gutachten zur öffentlichen Infrastruktur in Deutschland (Wissenschaftlicher Beirat am BMWi) [G5] sowie zu Nachhaltigem Konsum aus der Perspektive der Verbraucherpolitik veröffentlicht (Sachverständigenrat für Verbraucherfragen) [G6].



Abbildung 1: Das Team Energiemarktdesign am Energie Campus Nürnberg.

Schon seit 2013 bietet das internationale Doktorandenkolleg „Evidence Based Economics“ (gemeinsam mit der LMU München und der Universität Regensburg, Koordination in Nürnberg: Prof. Dr. Veronika Grimm) eine strukturierte Doktorandenausbildung. Im Rahmen der Schöller-Fellowships von Dr. Harry van der Weijde und Prof. Dr. Miguel Anjos (beide University of Edinburgh) konnte die internationale Forschungskooperation ausgebaut werden. Außerdem konnten mit dem 2019 ins Leben gerufenen Fellowship-Programm am EnCN weitere Kooperationspartner enger an den Forschungsbereich EMD gebunden werden. In diesem Rahmen kann auch in Zukunft eine enge Kooperation mit den ehemaligen EnCN-EMD-Mitgliedern Prof. Dr. Martin Schmidt (Uni Trier) und PD Dr. Lars Schewe (University of Edinburgh) erhalten werden und neue Kooperationen, wie mit Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh) und Prof. Dr. Miguel Anjos (University of Edinburgh/Polytechnique Montréal) aufgebaut werden. Dr. Harry van der Weijde hat von der Alexander von Humboldt-Stiftung ein angesehenes Humboldt-Forschungsstipendium erhalten und verstärkt in 2021 den Bereich EMD mit der Analyse von Risiken in verbraucherorientierten Energiemärkten. Die aktuelle Lage aufgrund der Corona Pandemie stellte die EMD Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlicher vor große Herausforderungen, da geplante Formate der Zusammenarbeit und des wissenschaftlichen Austausches im Jahr 2020 nicht realisiert werden konnten. Im Gegenzug profitierte der EnCN im Jahr 2020 wesentlich von der Möglichkeit des Austausches mit Kooperationspartnern in digitalen Formaten, wodurch die öffentliche Wahrnehmung und wissenschaftliche Vernetzung gleichsam neue Impulse erfuhren. Auch die Lehre an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg profitiert weiterhin in hohem Maße von den Aktivitäten am EnCN. Es wurden etwa 20 Abschlussarbeiten für Bachelor- und Masterstudierend betreut. Die Bachelorarbeit von Johannes Wirth, mit dem Titel „Möglichkeiten der CO₂-Bepreisung in Europa in Ergänzung zum EU-ETS“, wurde mit dem EnCN-Energiepreis 2020 ausgezeichnet. Ein breites Spektrum mathematischer und ökonomischer Vorlesungen und ein Seminar in Kooperation mit der N-ERGIE AG boten den Studierenden verschiedener Studienrichtungen außerdem ein umfangreiches Lehrangebot zu Herausforderungen in der Energiewirtschaft.

1 Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten

Modellierung von Strommärkten

Im ersten Teilprojekt „Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten“ arbeiten Mathematiker und Volkswirte an der mehrstufigen Modellierung von Strommärkten sowie an der Entwicklung von mathematischen Verfahren für deren Lösung. Im Fokus stehen die Entscheidungen der verschiedenen Akteure im liberalisierten Strommarkt, die in mehrstufigen Gleichgewichtsmodellen analysiert werden. Dabei wird untersucht, inwieweit sich alternative Rahmenbedingungen, die im Kontext der Energiewende diskutiert werden, auf Investitionen auswirken können und wie nahe das Ergebnis am Systemoptimum liegt. Die interdisziplinäre Kooperation in der Modellentwicklung hat bereits in der ersten Förderphase des EnCN wesentlich zur Entwicklung eines mehrstufigen Strommarktmodells (Grimm et al., 2016 [1]) beigetragen und wurde seitdem mit mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu theoretischen und angewandten Forschungsfragen erfolgreich fortgesetzt. Durch Master- und Bachelorarbeiten, z. B. zu den Themen flexible Verbraucher und CO₂-Bepreisung, konnten Studierende der FAU Erlangen-Nürnberg in die Forschung am EnCN mit eingebunden werden. Auch werden aktuell Modellansätze zur Kopplung von Strommärkten mit Gasmärkten, Wasserstoffmärkten und mit batterieelektrischer Mobilität weiterentwickelt (Egerer et al., 2021 [31]). Daraus ergeben sich eine Reihe interessanter Forschungsfragen an der Schnittstelle zum EMD-Teilprojekt „Ökonomische Analyse von Gasmärkten“. Außerdem wurde die Kooperation mit den Ingenieurwissenschaften aus dem Projekt Speicher B am EnCN im Bereich der Kopplung von Stromwirtschaft und Wasserstoffmobilität erfolgreich fortgeführt (Runge et al., 2020 [32], Runge et al., 2019 [2]). Im Rahmen des Verbundprojekts EOM-Plus (7. Energieforschungsprogramms des BMWi) untersucht ein Team um Prof. Dr. Veronika Grimm und Dr. Jonas Egerer, mit Kollegen der TH Ingolstadt und der Stiftung Umweltenergierecht (Würzburg) kurz- und mittelfristige Auswirkungen von marktbasieren Engpassinstrumenten als regionale und temporäre Ergänzung zum bestehenden Energy-Only-Strommarktdesign. Im Kontext der Diskussion zur CO₂-Abgabe als Teil des Klimaschutzpakets der Bundesregierung wurden im Projekt EMD aus juristischer Sicht Möglichkeiten sozialverträglicher CO₂-Preise untersucht (Ismer et al., 2020 [3]). Für die internationale Perspektive beschäftigen sich Ismer (2020) [4] und Ismer, Neuhoff und Pirlot (2020) [33] mit Ansätzen für CO₂-Preise auf Produkte die in den europäischen Binnenmarkt importiert werden. Darüber hinaus haben Garnadt, Grimm und Reuter (2020) [34] die in internationalen Handelsströmen eingebetteten CO₂-Emissionen näher untersucht (Abbildung 2) und ausführlich mögliche Ausgestaltungen eines CO₂-Grenzausgleichs vor diesem Hintergrund diskutiert.

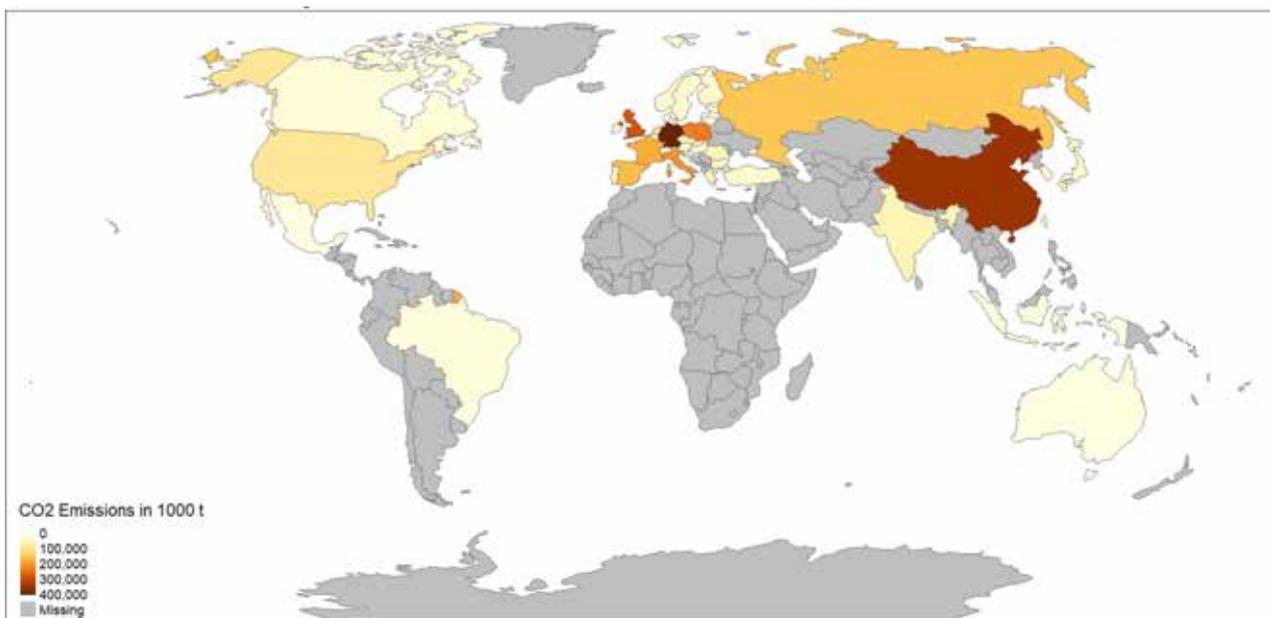


Abbildung 2: Ursprung von CO₂-Emissionen die in der Endnachfrage des EU-ETS enthalten sind. Vgl. Garnadt et al. (2020) [34].

Anwendungen und Weiterentwicklung der Methoden

Im Jahr 2020 wurden verschiedene aktuelle Fragen der energiepolitischen Diskussion in Deutschland detailliert beleuchtet. Für die Betrachtung des deutschen Strommarktes wurde das „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Modell (Grimm et al., 2016 [1]) genutzt, das mit geeigneten Daten für die Szenarien des Netzentwicklungsplans kalibriert ist (Ambrosius et al., 2019 [35]). In verschiedenen Beiträgen konnte gezeigt werden, dass Anpassungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen, z. B. die Einführung einer zweiten deutschen Preiszone (Ambrosius et al., 2020 [5]; Grimm et al., 2019 [6]) oder die Abregelung von Erneuerbaren Energien durch Einspeisemanagement (Grimm et al., 2021 [7]), zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und Einsparungen beim Netzausbau führen können. Grimm et al. (2019) [8] untersuchen mit Hilfe des GATE Modells die Einführung einer regional differenzierten Netzentgeltkomponente (G-Komponente) zur Generierung regionaler Investitionsanreize und zeigen, dass diese zwar in der Lage ist lokale Investitionsanreize für neue Erzeugungsanlagen zu setzen, kurzfristig aber nicht zu differenzierten Preissignalen am Strommarkt führt. Daher können im Gegensatz z. B. zu einem Nodalpreissystem keine signifikanten Auswirkungen auf die Wohlfahrt oder den Netzausbau festgestellt werden. Eine Untersuchung zu Kosten- und marktbasierendem Redispatch als Instrument des Engpassmanagements in Strommärkten mit Preiszonen (Grimm et al., 2020 [36]) zeigt, dass marktbasierter Redispatch im Vergleich zu kostenbasiertem Redispatch zu Wohlfahrtsverlusten führen kann, wenn die Netzbetreiber, die den optimalen Redispatch bestimmen, dabei mit dem Ziel der Minimierung ihrer Redispatchkosten agieren. In einem weiteren Projekt wird derzeit die Fragestellung analysiert, welchen Einfluss Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen auf den optimalen Ausbau konventioneller und erneuerbarer Energien haben. Die dabei betrachteten Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emission sind ein gesetzlich festgelegter Kohleausstieg bis 2035 und die Erhöhung der CO₂-Bepreisung im Stromsektor, z. B. mittels Einführung eines nationalen Mindestpreises für den Europäische Emissionshandel.

Für den Atom- und Kohleausstieg bedarf es eines ambitionierten Ausbaupfads der erneuerbaren Stromerzeugung. Dabei wird die regionale Verteilung neuer Investitionen eine zentrale Rolle für die zukünftigen Kosten des Stromsystems haben. In Kooperation mit Prof. Dr. Martin Bichler (Technische Universität München, TUM) wurde deshalb untersucht, wie verschiedene Auktionsformate die Höhe der Einspeisevergütung und die regionale Verteilung von neuen Investitionen in erneuerbare Erzeugungsanlagen beeinflussen (Bichler et al., 2020 [9]). Basierend auf Felddaten und mithilfe numerischer Simulationen wurde für verschiedene Auktionsregimes das Ergebnis sowohl nationaler als auch regionaler Windausschreibungen in Deutschland berechnet, wobei unterschiedlich starke Synergien berücksichtigt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Nutzung kombinatorischer Auktionen mit regionalen Quoten einen gezielten Ausbau von Kapazitäten ermöglichen würde und so zu einer vermehrt lastnahen Ansiedlung von Windkraftkapazitäten im Süden beitragen könnte (Abbildung 3). Auf Basis dieser Erkenntnisse können wertvolle Vorschläge zur Verbesserung des deutschen Auktionsregimes erarbeitet werden.



Abbildung 3: Regionale Verteilung neuer Windkraftanlagen in Deutschland mit einer Leistung von insgesamt 2600 MW für verschiedene Ausschreibungsregimes. Vgl. Bichler et al. (2020) [9].

Ein weiteres Forschungsthema im Teilprojekt ist die Betrachtung der Auswirkung von regulatorischer Unsicherheit und von Risikoaversion der Akteure in Kooperation mit Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh). Ambrosius et al. (2020) [10] untersuchen regulatorische Unsicherheit im Strommarkt, in Bezug auf zukünftige Änderungen von Marktbedingungen und Marktregeln. Regulatorische Unsicherheit wird in der energiepolitischen Debatte oft als Hemmnis von Investitionen in Erzeugungs- und Übertragungskapazitäten angeführt. Dies kann in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung am Beispiel einer möglichen Einführung von Preiszonen als Quelle der Unsicherheit detailliert analysiert werden. Es zeigt sich, dass bereits eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Einführung von Preiszonen zu veränderten Investitionsentscheidungen führt. Unsicherheit hat dabei Einfluss auf den Netzausbau, die regionale Verteilung von Investitionen in Erzeugungskapazität sowie auf den Technologiemix. Die Erwartung eines effektiveren Marktdesigns kann dabei durchaus zu Effizienzsteigerungen führen, selbst wenn sich diese Erwartungen nicht realisieren. Außerdem entwickeln Ambrosius et al. (2020) [37] ein stochastisches mehrstufiges Gleichgewichtsmodell mit risikoaversen Agenten, das Investitionen in Übertragungs- und Erzeugungskapazität abbildet. Sie können zeigen, dass der Effekt der Risikoaversion in einem Markt mit Knotenpreisen stärker ausgeprägt ist als in einem Markt mit einem Einheitspreis. Darüber hinaus können Netzplaner, die nicht die Risikoaversion von Erzeugungsunternehmen antizipieren, erhebliche zusätzliche Kosten verursachen.

Bei der Weiterentwicklung von Lösungsansätzen und der Analyse des Strommarktmodells wurden in der zweiten Förderphase des EnCN erhebliche Fortschritte erzielt. Krebs und Schmid (2019) [38] und Krebs, Müller und Schmid (2019) [39] bewiesen grundlegende Aussagen zur Eindeutigkeit von Gleichgewichten in Strommärkten. Diese Arbeiten konnten durch die Betrachtung von Speichern und die Weiterentwicklung von Lösungsverfahren für mehrstufige Energiemarktmodelle fortgeführt werden. Dabei zeigen Grübel et al. (2020) [11], dass bei der Modellierung von Speichern mehrere Marktgleichgewichte existieren können, die Herleitung hinreichender Bedingungen aber Eindeutigkeit von Erzeugung und Nachfrage garantiert. Mithilfe eines maßgeschneiderten, parallelisierten und verteilten ADMM-Algorithmus können dann Spotmarktgleichgewichte über lange Zeiträume effizient berechnet werden. Egerer et al. (2020) [12] eröffnen durch eine Abbildung von Nachbarmärkten in mehrstufigen Marktmodellen die Grundlage, regionale Ausbauentscheidungen in einem integrierten Strommarkt zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Berücksichtigung des Gesamtsystems die regionale Planung verbessern, aber auch einzelne Investitionsentscheidungen beeinflussen kann. Der Modellansatz ist von großer Bedeutung für die Untersuchung zentraler Fragen der deutschen Energiewende im europäischen Kontext. Aigner et al. (2020) [40-41] beschäftigen sich mit dem optimalen Betrieb von Stromnetzen. Aigner et al. (2020) [40] behandelt das AC Strommodell, während in Aigner et al. (2020) [41] robust sichere Approximationen für die Vermeidung von Überlastung bei unsicherer Solareinspeisung im DC Modell angegeben werden. Klassische Lösungsverfahren für mehrstufige Optimierungsprobleme verwenden oft eine so genannte BigM-Linearisierung. In Kleinert et al., 2020 [14] wird gezeigt, dass darauf basierende Verfahren in der Praxis oft nicht verwendet werden können. In Kleinert und Schmidt (2020) [15] [42] werden deshalb Alternativen zur BigM-Linearisierung diskutiert, z. B. wird eine Heuristik für zweistufige Optimierungsprobleme vorgestellt, die ohne eine solche Linearisierung auskommt. Kleinert et al. (2020) [16] beschreiben und testen für lineare zweistufige Probleme, durch Ausnutzen der starken Dualitätsbedingung der unteren Stufe, eine neue gültige Ungleichung.

Im Rahmen eines interdisziplinären Projektvorhabens zwischen Forschenden der Ingenieurwissenschaften (Speicher B) und Wirtschaftswissenschaften (Energiemarktdesign) werden synthetische Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als nachhaltige Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft untersucht. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Auswirkungen verschiedener Strommarktdesigns auf die Produktionskosten der Kraftstoffe. Runge et al. (2020) [32] und Runge et al., 2019 [2] untersuchen das globale Potential nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe, da diese CO₂-neutrale Alternativen zu konventionellen Erdölprodukten darstellen. Bei der Produktion von synthetischen Kraftstoffen machen Stromkosten einen wesentlichen Teil der Herstellungskosten aus. Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien sind in den letzten Jahren stark gesunken, variieren global aber sehr stark. Es werden mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, die sich durch die gute Verfügbarkeit und ihr großes Potential erneuerbarer Stromerzeugung auszeichnen und aus denen in Zukunft Wasserstoff nach Deutschland und Europa importiert werden könnte. Parallel dazu wird zu einem gewissen Umfang auch Elektrolyse auf regionaler Ebene in Deutschland einen Beitrag leisten. Zur Untersuchung von Interaktionen zwischen Strom- und Gasmärkten und zukünftigen Wasserstoffmärkten in Deutschland wird ein Marktmodell für mehrere Energiemärkte entwickelt (Abbildung 4). Egerer et al. (2021) [31] beschreiben hierzu hinreichende Bedingungen für die

Eindeutigkeit des kurz- und langfristigen Marktgleichgewichts in gekoppelten Märkten mehrerer Energiesektoren. Mit dem darauf aufbauenden mehrstufigen Marktmodell kann der Einfluss des Marktdesigns in Strom-, und Gas- und Wasserstoffmärkten auf die Transformation des Energiesystems untersucht werden.

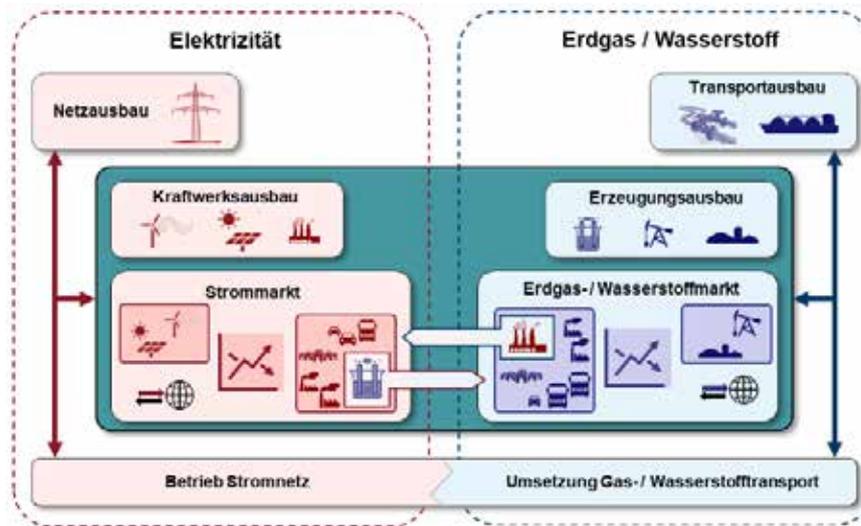


Abbildung 4: Kopplung der Energiemärkte für die Sektoren Strom, Erdgas und Wasserstoff. Eigene Darstellung.

Im kommenden Jahr werden die aktuell laufenden Aktivitäten fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung der Methoden im Hinblick auf dezentrale Strommärkte (Projekt EOM-Plus) sowie auf Fragen des Marktdesigns bei der Sektorkopplung von Strom-, und Gas- und Wasserstoffmärkten. Außerdem wird die Wasserstofflogistik von Produktion blauen und grünen Wasserstoffs, über den internationalen Wasserstofftransport, bis zur Integration von Wasserstoff in Nachfragemärkte untersucht. In diesem Rahmen soll auch die Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B und weiteren Kooperationspartnern aus der Industrie weiter ausgebaut werden. Eine Weiterentwicklung der Strommarktmodellierung erfolgt aktuell außerdem mit einer Abbildung des Flow-Based Market Couplings (Lang, Dallinger und Lettner, 2020 [17]). Die enge Zusammenarbeit im Rahmen eines Doktorandenprojekts im von der EU geförderten Marie-Curie ITN MINOA (Betreuer: Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Martin Schmidt) wird im Rahmen der Arbeiten an nichtlinearen Strommodellen unter Unsicherheit weitergeführt.

Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Mirjam Ambrosius, Dr. Robert Burlacu, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Roland Iser, Dr. Thomas Kleinert, Vanessa Krebs, Sandra Kretschmer, Lukas Lang, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Galina Orlinskaya, Dr. Jan Rolfes, Dr. Bastian Rückel, Philipp Runge, Dr. Christian Sölch, Johannes Thürauf, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Kooperationspartner: Prof. Dr. Martin Bichler (Technische Universität München), PD Dr. Lars Schewe (University of Edinburgh), Prof. Dr. Martin Schmidt (Universität Trier), Prof. Dr. Miguel Anjos (University of Edinburgh/Polytechnique Montréal) und Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh)

2 Ökonomische Analyse von Gasmärkten

Modellierung von Gasmärkten

Im zweiten Teilprojekt „Ökonomische Analyse von Gasmärkten“ werden angewandte Studien zum deutschen und europäischen Gasmarkt durchgeführt. Hierbei steht das europäische Entry-Exit System im Fokus und es wird insbesondere untersucht, inwieweit dieses System zu Effizienzverlusten durch ungenutzte Netzkapazitäten führt. Auf Basis dieser Analysen werden dann mögliche Modifikationen des Systems vorgeschlagen, um zu einer besseren Nutzung der Netzinfrastruktur zu gelangen. In diesem angewandten Kontext wird auf den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs/Transregio (SFB TRR) 154 (Sprecher Prof. Dr. Alexander Martin) „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken“ aufgebaut, an dem mehrere Forschende aus EnCN EMD an Teilprojektleitungen beteiligt sind (Grimm, Liers, Martin, Schewe, Schmidt, Zöttl). Der TRR 154 befindet sich aktuell in der 2. Förderphase (2018-2022).

Mit der mathematischen Beschreibung eines mehrstufigen Gasmarktproblems (Grimm et al., 2019 [18]) wurde in der Zeit vor dem Berichtsjahr 2020 der formale Rahmen für die Analyse von Entry-Exit Gasmärkten geschaffen. In der Veröffentlichung wird ein mehrstufiges Optimierungsproblem beschrieben, das den zeitlichen Ablauf des europäischen Gasmarktes innerhalb einer Entry-Exit Zone widerspiegelt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, ist dabei zwischen der physikalischen Systembetrachtung der Gasnetzbetreiber (links) und der Interaktion auf dem Gasmarkt (rechts) zu unterscheiden. Gasnetzbetreiber bestimmen über die technischen Kapazitäten und die Buchungspreise (Stufe 1) sowie den kostenoptimalen Betrieb des Gastransports (Stufe 4), während die Marktakteure durch Buchungen von Kapazitäten (Stufe 2) und Nominierungen (Stufe 3) am Gasmarkt handeln. Die Arbeiten in diesem Forschungsschwerpunkt betrachten aufbauend auf dieser Grundlage realitätsnahe Kalibrierungen für das deutsche System und liefern damit Abschätzungen für die konkreten Ineffizienzen des Entry-Exit Systems.

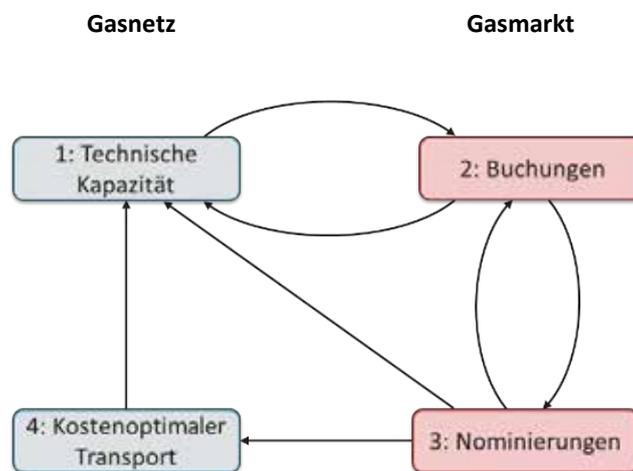


Abbildung 5: Abhängigkeiten in dem mehrstufigen Modell des Europäischen Entry-Exit Systems. Eigene Darstellung.

Das resultierende mehrstufige Optimierungsproblem beinhaltet eine explizite Betrachtung der Interaktion unterschiedlicher Marktteilnehmer und kann Einblicke geben, inwieweit sich durch eine Modifikation der Handelsregeln eine effizientere Nutzung der Netzkapazitäten erreichen und als Folge der Investitionsbedarf in das Gasnetz reduzieren lässt. Für einzelne Stufen und Aspekte des mehrstufigen Optimierungsproblems, wie z. B. für die Buchungsvalidierung durch den Netzbetreiber, wurden erste Resultate für verschiedene Strukturen von Modellen des Gastransports erzielt (Labbé et al., 2021 [19]; Labbé, Plein und Schmidt, 2019 [20]; Schewe, Schmidt und Thürauf, 2019 [21]; Schewe, Schmidt und Thürauf, 2020 [22]; Thürauf, 2020 [43]). Grimm et al. (2020) [44] analysieren mehrstufige Spiele mit mehreren Spielern auf beiden Stufen (Abbildung 6) und entwickeln einen Lösungsalgorithmus, der alle Gleichgewichte einer bestimmten Klasse an Spielen findet. Der Algorithmus wird in einer Case-Study auf Nominierungs- und Buchungsentscheidungen auf Gasmärkten angewandt. Kleinert, Grimm und Schmidt (2021) [23] entwickeln Algorithmen zur Lösung einer bestimmten Klasse an gemischt-ganzzahligen mehrstufigen Optimierungsproblemen und präsentieren

numerische Studien, die die Anwendbarkeit der Probleme illustrieren. Böttger et al. (2020) [45] nutzen ein vierstufiges Modell des Entry-Exit Gasmarktes (Grimm et al., 2019 [18]), um die Effizienzverluste eines Entry-Exit-Systems im Vergleich mit einem Systemoptimum zu ermitteln. Schewe, Schmidt und Thürauf, 2020 [46] entwickelten Lösungsmethoden für ein vierstufiges Modell des Entry-Exit Gasmarktes (Grimm et al., 2019 [18]) in Bezug auf eine spezifische Netzwerktopologie, die es erlauben das Entry-Exit Modell für bestimmte Gasnetzwerke in realer Größe zu lösen. In Biefel et al. (2020) [47] wurden lineare Komplementaritätssysteme untersucht, mit denen sich Marktgleichgewichte modellieren lassen. Es wurden Aussagen zu Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen unter affin robusten Entscheidungsregeln getroffen. Die Ergebnisse von Liers, Schewe und Thürauf (2021) [24] geben erste Ergebnisse auf dem Weg zum Verständnis von Kapazitätsmaximierung in einem zunächst vereinfachten Setting.

Zusätzlich kann für die Modellierung von Entry-Exit Gasmärkten im Forschungsschwerpunkt vielfach auf die grundlegenden Ergebnisse des SFB TRR 154 zurückgegriffen werden (Burlacu et al., 2019 [25]; Grimm et al., 2019 [26]; Kufner et al., 2019 [27]; Kleinert, Grimm und Schmidt, 2021 [22]; Liers et al., 2020 [48]).

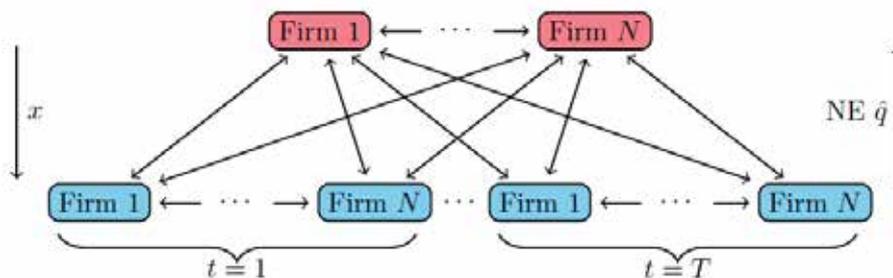


Abbildung 6: Spielstruktur mit mehreren Leadern und Followern. Vgl. Grimm et al. (2020) [43].

Anwendungen

Im Rahmen der Kooperation zwischen TRR 154 und dem EnCN werden zur Erstellung von finalen Dateninstanzen die bestehenden Datenbestände weiter zusammengeführt und aufbereitet, um insbesondere auch ökonomische Fragen in beiden Projekten adressieren zu können. In den im Rahmen des EnCN betrachteten Anwendungen sollen verstärkt Methoden zum Einsatz kommen, die im TRR 154 entwickelt wurden. In der zweiten Förderphase des TRR 154 (2018–2022) spielt dabei die mathematische Analyse von Marktthemen eine größere Rolle. Ökonomische Analysen zu europäischen Gasmärkten erfordern für die Abbildung bestehender Marktregeln die Modellierung des Entry-Exit Systems. Dabei werden alle physikalischen Randbedingungen auf Handelskapazitäten an marktrelevanten Punkten reduziert. Dies sind innerhalb einer Zone die grenz- und zonenüberschreitenden Netzpunkte sowie Punkte mit Erdgasspeichern oder Gasproduktion. Für den deutschen Gasmarkt wurde für eine der beiden Marktzone bereits ein Datensatz erstellt (Abbildung 7). Dieser beinhaltet die historischen Gasflüsse an den marktrelevanten Punkten und eine vereinfachte geographische und physikalische Darstellung des Transportnetzes inklusive der Verdichter und der Übergabepunkte zu Nachbarzonen und Endverbrauchern. Die grundlegenden Eigenschaften des Datensatzes sind durch erste Berechnungen validiert worden. Auf dieser Basis werden aktuell Forschungsfragen bezüglich der Bereitstellung von Marktkapazitäten sowie ein Vergleich verschiedener Marktdesigns, unter Berücksichtigung der physikalischen Flussbedingungen, untersucht.

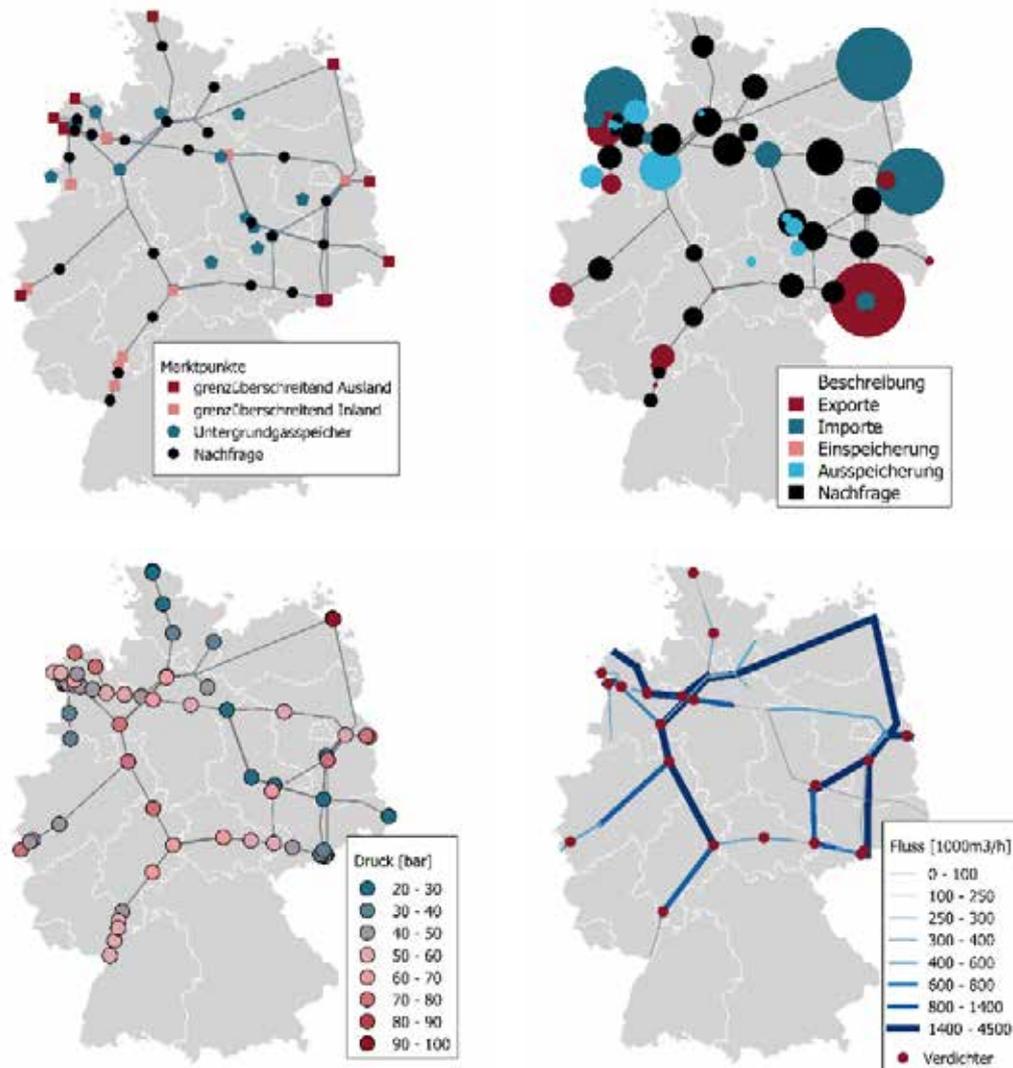


Abbildung 7: Darstellung der GASPOOL Marktregion mit wichtigen Pipelines sowie Markt- und Nachfragepunkten (links oben), Ein- und Ausspeisung an einem Wintertag (rechts oben) und Modellergebnisse mit Druckniveaus an Netzknoten (links unten) und Gasflüssen mit Verdichterstationen (rechts unten). Eigene Darstellung.

Eine zentrale Herausforderung für die Energiewende ist die Substitution von fossilen Erdöl und Erdgas im Energiesystem. Um dieses Ziel erreichen zu können, wird Sektorenkopplung im Energiesystem eine entscheidende Rolle spielen. An der Schnittstelle zwischen den Forschungsschwerpunkten „Investitionsanreize in liberalisierten Strommärkten“ und „Ökonomische Analyse von Gasmärkten“ wurde daher die Grundlage für ein neues Marktmodell entwickelt, das eine Abbildung von mehreren Energiemärkten in mehrstufigen Optimierungsproblemen erlaubt (Egerer et al., 2021 [31]). Dabei ist insbesondere eine detaillierte Abbildung der Schnittstellen zwischen verschiedenen Energiemärkten eine zentrale Herausforderung (Abbildung 8). Für Anwendungen auf das deutsche Energiesystem werden die Vorarbeiten zu detaillierten regionalen Datensätzen für Strom- und Gasmärkte aktuell um Wasserstoff erweitert. Dafür werden neben den Produktionskosten in verschiedenen Regionen der Welt auch die erforderliche Wasserstofflogistik für den globalen Handel und zukünftige Nachfrageszenarien in Deutschland für die Sektoren Industrie, Mobilität und Wärme untersucht. Diese Daten bilden die Grundlage für die Untersuchung von gekoppelten Energiemärkten auf die nachhaltige Transformation des deutschen Energiesystems und regionale Implikationen auf Angebot und Nachfrage. Mit der Modellierung von Sektorenkopplung kann damit zukünftig eine Vielzahl für die Energiewende relevanter Forschungsfragen adressiert werden, z. B. die Rolle von sektorenspezifischen Steuern und Abgaben, von Power-to-Hydrogen Technologien zur Speicherung überschüssiger erneuerbarer Stromerzeugung und von sektorenübergreifender Planung von Investitionen in Netzinfrastruktur.

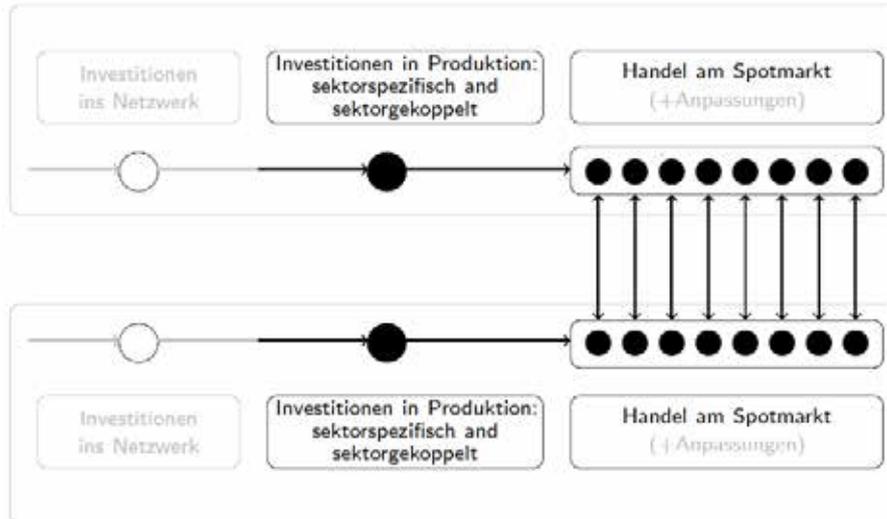


Abbildung 8: Mehrstufige Struktur der Investitionen in Netzwerk- und Produktionskapazitäten und des anschließenden Handels in und zwischen mehreren Sektoren. Vgl. Egerer et al. (2021) [31].

Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Dr. Robert Burlacu, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Julia Grübel, Dr. Thomas Kleinert, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Dr. Jan Rolfes, Julia Schwab, Johannes Thürauf, Ann-Katrin Wirtz, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Kooperationspartner: PD Dr. Lars Schewe (Universität Edinburgh), Prof. Dr. Martin Schmidt (Universität Trier)

3 Geschäftsmodelle in Smart Grids

Allgemeine Problemstellung

Im Rahmen der Energiewende verlagert sich ein Großteil der energiewirtschaftlichen Aktivitäten in die niedrigen Spannungsebenen des Stromnetzes. Die damit einhergehende Dezentralisierung bringt neben technologischen Umstellungen auch eine Veränderung der Stakeholderstruktur mit sich. Oftmals sind es heute eine große Zahl an Klein- und Mittelständlern oder auch Privatpersonen, die als Investoren und Betreiber von Anlagen in einer Smart-Grid-Umgebung auftreten. Daneben bestehen weiterhin die traditionellen Konzerne der Energiebranche, die ebenfalls nach attraktiven Geschäftsmodellen im Smart Grid suchen. In diesem Teilprojekt „Geschäftsmodelle in Smart Grids“ untersuchen Mathematiker, Ökonomen und Juristen, mithilfe welcher Marktmechanismen und Anreizstrukturen eine sinnvolle Interaktion all dieser Marktteilnehmer stattfinden kann, sodass basierend auf den technischen Möglichkeiten eines Smart Grids die Implementierung eines für alle Beteiligten effizienten (smarten) Energiesystems in den niedrigen Spannungsebenen des Stromnetzes erreicht wird. Neben der Analyse der Anreizstruktur in mehrstufigen Marktmodellen wird auch das Investitionsverhalten in empirischen Studien untersucht. Außerdem findet eine detaillierte Auseinandersetzung mit den rechtlichen Rahmenbedingungen statt.

Die Forschungsarbeiten bauen auf Vorarbeiten aus der ersten Förderphase des EnCN auf. Durch die Beteiligung an dem Projekt „Smart Grid Solar“ wurde der Grundstein für eine Modellierung des Zusammenspiels der Akteure im Verteilnetz gelegt. Außerdem wurde in einer umfangreichen Feldstudie im Rahmen des Förderprojekts „SWARM“ die Rolle von Pilotprojekten untersucht (Grimm, Kretschmer und Mehl, 2020 [28]). In laufenden Arbeiten mit stärkerem mathematischem Fokus werden diese verschiedenen Perspektiven ergänzt, indem Grimm et al. (2019) [49] optimale Tarifstrukturen auf der Endverbraucherebene in Smart Grids mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme bestimmen und Grimm et al. (2020) [29] das Zusammenwirken von Speicher- und Leitungsinvestitionen in Verteilnetzen in Hinblick auf den Regulierungsrahmen in einem zweistufigen Gleichgewichtsmodell untersuchen. Bohlayer et al. (2020) [30] untersuchen Investitionen in dezentrale Energiesysteme.

Anwendungen

Im Rahmen des Projekts SWARM (Akzeptanz und Adaption in der Energiewende am Beispiel vernetzter Stromspeicher) wurde am EnCN untersucht wie sich die institutionelle Governance-Struktur von Pilotprojekten auf die Wahrnehmung von Innovationen auswirkt und welche Facetten von Pilotprojekten die Teilnahme für relevante Nutzergruppen besonders attraktiv machen (Grimm, Kretschmer und Mehl, 2019 [28]) (Abbildung 9). Es zeigt sich, dass eine Kooperation staatlicher, privatwirtschaftlicher und wissenschaftlicher Akteure im Rahmen von Pilotprojekten einen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung getesteter Produkte hat. Hinsichtlich der Bereitschaft zur Teilnahme an Pilotprojekten wird von potenziell Teilnehmenden insbesondere auf eine transparente Kommunikation und intensive Betreuung Wert gelegt. Diese sind sogar bedeutsamer als finanzielle Vorteile.

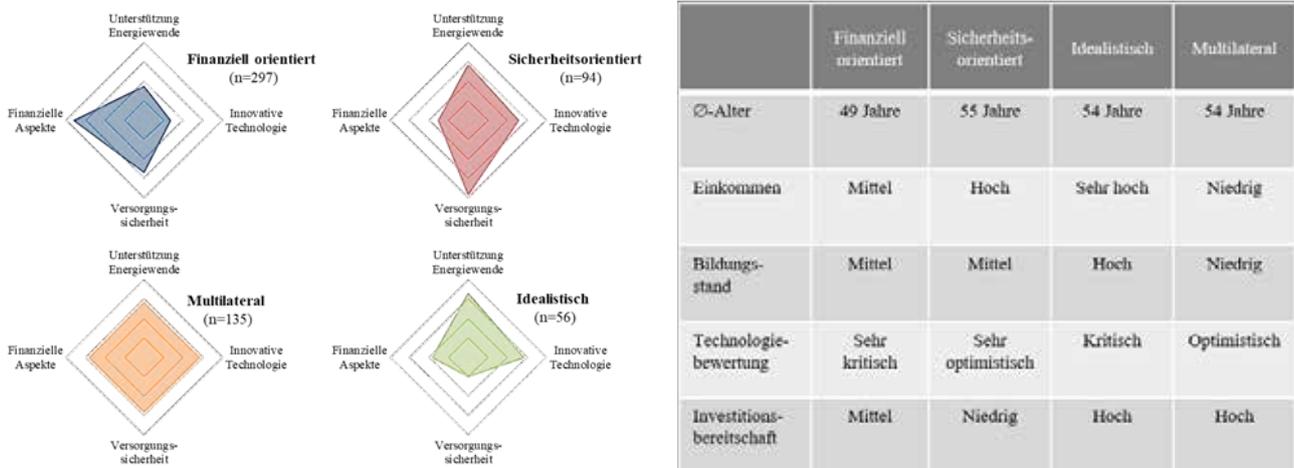


Abbildung 9: Relevanz verschiedener Kaufkriterien und Identifikation unterschiedlicher Investitionstypen. Eigene Darstellung.

In einem Projekt zu Investitionen in existierende dezentrale Energiesysteme entwickeln Bohlayer et al. (2020) [30] ein mehrstufiges stochastisches Optimierungsproblem, das Investitionsentscheidungen über mehrere Perioden unter Unsicherheit erfasst und das Problem bis zur globalen Optimalität löst (Abbildung 10). Um die Leistung von konventionellen Ansätzen, die in einem mehrjährigen Setup angewandt werden, zu bewerten und das Problem mit geringerem Rechenaufwand zu lösen, wird eine rollierende Horizont-Heuristik vorgeschlagen, um Näherungslösungen für das ursprüngliche mehrstufige stochastische Problem zu identifizieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Approximation von Investitionen durch zweistufige stochastische Ansätze die besten Ergebnisse hinsichtlich der Erfüllung von Nebenbedingungen bringt, während deterministische Approximationen schnellere und bessere Lösungen liefern.

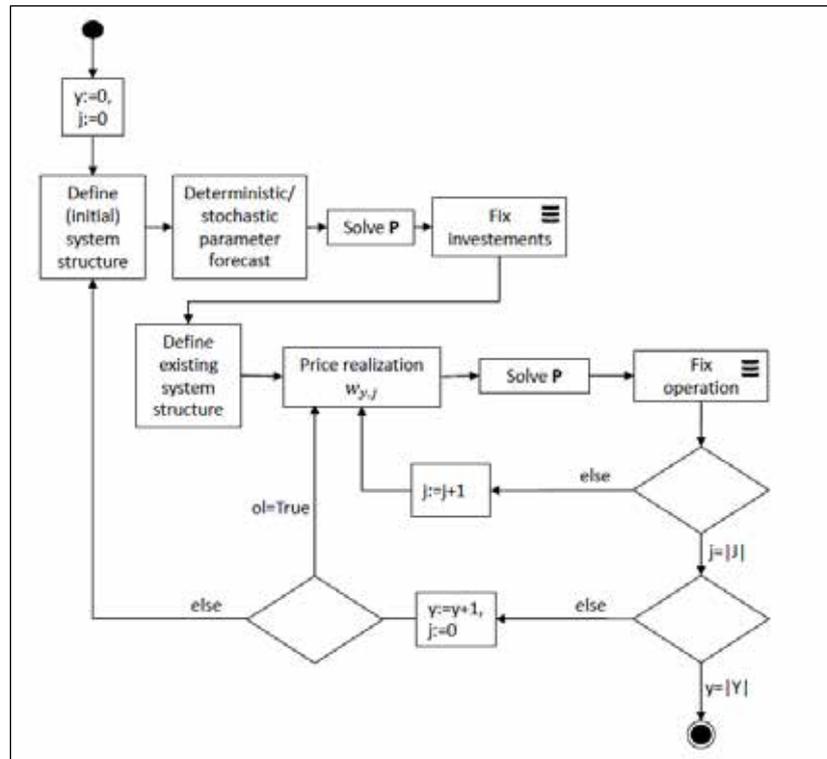


Abbildung 10: Rollierende Horizont-Heuristik um mehrjährige Investitions- und Betriebsentscheidungen zu identifizieren. Vgl. Bohlayer et al. (2020) [30].

Im Projekt "Smart Grid Solar" wurde am EnCN ein Strommarktmodell entwickelt, welches es erlaubt, die Auswirkungen unterschiedlicher regulatorischer Rahmenbedingungen auf Speicher- und Netzinvestitionen in Verteilnetzen zu analysieren (Grimm et al., 2020 [29]). In dem zweistufigen Gleichgewichtsmodell entscheidet ein regulierter Verteilnetzbetreiber über Netzinvestitionen und -betrieb, während er die Entscheidungen privater Akteure über Speicherinvestitionen und -betrieb antizipiert. Da insbesondere in Verteilnetzen die Spannungsstabilität und die Netzverluste einen entscheidenden Einfluss auf den Netzausbau und -betrieb haben, kommt eine linearisierte AC-Lastflussformulierung zum Einsatz, welche diese Aspekte angemessen berücksichtigt. Grimm et al. (2020) [29] untersuchen mit diesem Ansatz mögliche Anpassungen der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen, u.a. die Abregelung von erneuerbaren Energien, die Einführung eines Netzentgelts, das sich an der maximalen Einspeisung der erneuerbaren Energien orientiert sowie ein Subventionsprogramm für Speicherinvestitionen. Die Leistung der verschiedenen alternativen Rahmenbedingungen wird mit der Leistung nach den heute in verschiedenen Ländern üblichen Regeln sowie mit einem systemoptimalen Benchmark verglichen. Zur Veranschaulichung der wirtschaftlichen Auswirkungen ist das Modell mit Daten aus dem Feldprojekt „Smart Grid Solar“ kalibriert. Die Ergebnisse in Grimm et al. (2020) [29] zeigen, dass sowohl eine Abregelung erneuerbarer Produktion als auch eine Neugestaltung der Netzentgelte das Potenzial haben, die Gesamtsystemkosten deutlich zu reduzieren. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine reine Förderung von Speicherinvestition dagegen nur eine begrenzte Wirkung hat, solange der Verteilnetzbetreiber nicht in den Speicherbetrieb eingreifen darf.

Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Roland Ismer, Dr. Thomas Kleinert, Sandra Kretschmer, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Simon Mehl, Galina Orlinskaya, Dr. Bastian Rückel, Julia Schwab, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Kooperationspartner: PD Dr. Lars Schewe (Universität Edinburgh), Prof. Dr. Martin Schmidt (Universität Trier), Dr. Markus Bohlayer (Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft)

4 Schlussworte

Im Jahr 2020 konnte sich der Forschungsbereich Energiemarktdesign des EnCN sehr erfolgreich weiterentwickeln. Die Ergebnisse der Forschung wurden zumeist online auf Fachtagungen und auch im Rahmen der wirtschaftspolitischen Beratung in Gremien auf nationaler und EU-Ebene präsentiert, in internationalen Spitzenzeitschriften veröffentlicht und umfangreich in Wissenschaft und Politik rezipiert. Die Aktivitäten des EnCN sind prägend für den FAU-Forschungsschwerpunkt „Energiesysteme der Zukunft“, den Schwerpunkt „Modellierung, Simulation und Optimierung“ der Naturwissenschaftlichen Fakultät der FAU und den Schwerpunkt „Energiemärkte und Energiesystemanalyse“ des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der FAU. Die Vernetzung von EMD mit dem EnCN-Projekt Speicher B ist mit einer gemeinsamen hochrangigen Veröffentlichung und weiteren laufenden Projekten auf einem sehr erfolgreichen Entwicklungspfad. Durch die Verschränkung mit den Aktivitäten des Zentrum Wasserstoff.Bayern kann die Forschung zunehmend mit Industriekooperationen verknüpft werden. Insbesondere vor dem Hintergrund des European Green Deal und der damit einhergehenden ambitionierteren Klimaziele bekommt der schnelle Transfer von Forschungsergebnisse in die Praxis in den kommenden Jahren eine noch größere praktische Relevanz. Mit Blick auf die Struktur des Projekts Energiemarktdesign führt diese Entwicklung zu einem zunehmenden Verschmelzen der drei Teilprojekte und zu einer Intensivierung der Kooperation mit ingenieurwissenschaftlichen Forschungsgruppen. Neben einer Stärkung der gemeinsamen Aktivitäten mit Speicher B innerhalb des EnCN drückt sich der stärkere interdisziplinäre Fokus beispielsweise in dem jüngst gestarteten Verbundprojekt EOM-Plus aus, das gemeinsam mit der TH Ingolstadt (Ingenieurwissenschaften) und der Würzburger Stiftung Umweltenergierecht durchgeführt wird. Darüber hinaus wurden verschiedene Industrieprojekte angestoßen oder sind in Vorbereitung. In den Projekten, die zum Teil gemeinsam mit technischen Hochschulen stattfinden, werden auch die Möglichkeiten des BayWiss-Verbundkollegs für gemeinsame Promotionen genutzt.

Die Vernetzung mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern wurde im Rahmen von Workshops und anderen Austauschformaten auch im Jahr 2020 weiter vorangetrieben. Im November 2020 wurde unter Federführung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) und in Kooperation mit der Messe Nürnberg die zweitägige Konferenz „Hydrogen Dialogue“ durchgeführt, an der die Wissenschaftler aus EMD, die zahlreichen Unternehmens-Partner des „Wasserstoffbündnis Bayern“ und auch hochrangige Vertreter der Politik teilnahmen. Eine Fortführung des Formats ist im Sommer 2021 in Planung. Diese Aktivitäten werden nicht zuletzt der Vernetzung und der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft einen weiteren Schub verleihen und haben zum Ziel, Nürnberg als Standort einer weltweit sichtbaren Wasserstoffmesse zu etablieren. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen der Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft auf den Arbeitsmarkt in einer Kooperation mit dem Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB) näher untersucht werden. Erste Workshops zu diesem Themenkomplex fanden im April 2020 statt und werden 2021 in verschiedenen Veröffentlichungen und Projekten in diesem wichtigen Themenfeld münden. Außerdem wurde die Kooperation mit der University of Edinburgh intensiviert. Es konnten in dem Zusammenhang verschiedene Projekte mit Dr. Harry van der Weijde vorangetrieben werden, der seit 2018 im Rahmen eines „Schöller Junior Fellowships“ mit den FAU-Forschern des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften kooperiert. Im Jahr 2021 verbringt Dr. van der Weijde einen Gastaufenthalt an der FAU Erlangen-Nürnberg im Rahmen eines Humboldt Fellowships. In Zukunft werden sich die Beziehungen zur University of Edinburgh durch eine Kooperation mit PD Dr. Lars Schewe (der aus Erlangen im Jahr 2019 nach Edinburgh berufen wurde) sowie durch eine Kooperation mit dem Edinburgher Mathematik-Professor Miguel Anjos ausweiten, der ebenfalls mit einem Schöller-Fellowship ausgezeichnet wurde. Durch die Anbindung ehemaliger EMD-Forscher wie Prof. Dr. Martin Schmidt (in Trier seit Beginn 2019) und PD Dr. Lars Schewe sowie weiterer langjähriger Kooperationspartner als „EnCN Fellows“ und einem regelmäßigen Austausch wird ein starkes (inter-)nationales Netzwerk erhalten und ausgebaut.

Der Forschungsbereich EMD hat in den vergangenen Jahren erfolgreich Nachwuchsarbeit geleistet. Nachwuchsforschende werden systematisch in die oben aufgeführten nationalen und internationalen Kooperationen sowie in die Politikberatung eingebunden und übernehmen auch immer wieder Aktivitäten im Rahmen der „Third Mission“. In der Lehre werden seit Jahren Seminare und Abschlussarbeiten gemeinsam mit Kooperationspartnern aus der Wirtschaft durchgeführt. Im Jahr 2021 ist ein Seminar in Kooperation mit den zahlreichen Partnern aus dem

Wasserstoffbündnis Bayern geplant. Im Rahmen des 1000-Professoren-Programms von Bund und Ländern wurden in den vergangenen Jahren verschiedene W1-Professuren mit engem Bezug zu den Themen des Forschungsbereichs Energiemarktdesign besetzt. Berufen wurde bereits die W1-Professorin Dr. Verena Tiefenbeck, die zugleich eine Nachwuchsgruppe des Zentrum Digitalisierung Bayern zum Themenfeld „Digital technologies and human behaviour: transforming consumer behaviour in the energy and mobility sector“ eingeworben hat. Darüber hinaus wurde eine W1-Tenure-Track-Professur im Themenfeld „Future Energy Systems“ mit Prof. Dr. Mario Liebensteiner besetzt. Die im Department Mathematik ausgeschriebene W1 Professur im Umfeld der Optimierung von Energiesystemen ist zum 01.04.2021 mit Dr. Yiannis Giannakopoulos (bisher TU München) besetzt.

5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

Prof. Dr. Veronika Grimm war im Jahr 2020 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied im Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (seit 2020)
- Mitglied im Nationalen Wasserstoffrat der Bundesrepublik Deutschland (Seit 2020)
- Gewähltes Mitglied des DFG Fachkollegiums Wirtschaftstheorie (seit 2020)
- Vorstand des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), einer Initiative der Bayerischen Staatsregierung zur Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für Bayern (seit 2019)
- Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung des Energie Campus Nürnberg (seit 2019)
- Mitglied des Zukunftskreises zur Begleitung des dritten Foresight-Prozesses des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, BMBF (seit 2019)
- Mitglied des Energy Steering Panel of EASAC (European Academies' Science Advisory Council) auf Vorschlag der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina (seit 2018)
- Mitglied des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen am Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (seit 2018)
- Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (seit 2018)
- Mitglied des Vorstandes der ENERGIEregion Nürnberg e.V. (seit 2017)
- Mitglied des Arbeitskreises „Wettbewerbsökonomie“ des Bundeskartellamtes (seit 2017)
- Sprecherin des FAU-Forschungsschwerpunkts „Energiesysteme der Zukunft“, zusammen mit D. Guldi (seit 2017)
- Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung des Energie Campus Nürnberg (seit 2017)
- Managing Guest Editor, Games. Special Issue „Games and Market Design“ (seit 2017)
- Mitglied des Vorstands, ENERGIEregion Nürnberg e.V. (seit 2017)
- Stellvertretende Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats des ifo Instituts und des CESifo Netzwerks (seit 2016)
- Mitglied des Verwaltungsrats des ifo Instituts und des CESifo Netzwerks (seit 2016)
- Research Fellow, CESifo, München (seit 2016)
- Mitglied des Beirats von ForumV (seit 2016)
- Sprecherin des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (seit 2016)
- Dekanin der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (seit 2018)
- Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (seit 2015)
- Sprecherin des Forschungsschwerpunkts „Energiemärkte und Energiesystemanalyse“ des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (seit 2015)
- Mitglied des Kuratoriums des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (seit 2015)
- Mitglied des Erweiterten Vorstands des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2015)
- Mitglied des Steering Boards, Campus Future Energy Systems (seit 2015)

- Mit-Herausgeberin von Perspektiven der Wirtschaftspolitik (PWP) (seit 2015)
- Mitglied der Expertenkommission „Stärkung von Investitionen in Deutschland“ des BMWi (seit 2014)
- Mitglied des Sozialwissenschaftlichen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2011)
- Mitglied des Industrieökonomischen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2010)

Prof. Dr. Roland Ismer war im Jahr 2020 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied im wissenschaftlichen Beirat der Berliner Steuergespräche (seit 2019)
- Herausgeber des Kommentars Doppelbesteuerungsabkommen: DBA (7. Auflage) (seit 2017)
- Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat der Deutschen Steuerjuristischen Gesellschaft (DStJG) (seit 2017)
- DIW Research Fellow, Berlin (seit 2015)
- Fachbeirat im Spektrum der Rechtswissenschaft in Wien (seit 2015)
- Mitglied des Forschungsnetzwerkes Climate Strategies (seit 2014)
- Mit-Herausgeber der Zeitschrift Mehrwertsteuerrecht (MwStR) (seit 2013)
- Stellvertretender Vorsitzender im Umsatzsteuerforum (seit 2012)
- Vorstandsmitglied des Vereins Nürnberger Steuergespräche e.V. (NSG) (seit 2010)

Prof. Dr. Frauke Liers war im Jahr 2020 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat Zuse Institut Berlin (seit 2020)
- Mitglied Vorstand SFB 1411 Design of Particulate Products (seit 2020)
- Managing Guest Editor, Mathematical Methods of Operations Research. Special Issue Energy Networks (seit 2020)
- Mitglied Editorial Board Discrete Optimization (seit 2018)
- Mitglied des Vorstandes des SFB/TRR 154 Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzen (seit 2017)
- Mitglied Editorial Board Optimization and Engineering (seit 2016)
- Mitglied Editorial Board Mathematical Methods of Operations Research (seit 2015)
- Studiendekanin, Department Mathematik, FAU (von 2016 bis 2019)

Prof. Dr. Alexander Martin war im Jahr 2020 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) (seit 2019)
- Mitglied im Senats- und Bewilligungsausschuss für Graduiertenkollegs der DFG (seit 2019)
- Mitglied des Vorstandes der Gesellschaft für Operations Research (GOR) (seit 2019)
- Sprecher des Zentrum für Analytics – Daten – Anwendungen (ADA-Lovelace-Center) im Rahmen des Programms Bayern Digital II des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (seit 2018)
- Mitglied des Meeting Committee der European Mathematical Society (seit 2017)
- Associate Editor, Journal of Optimization Theory and Applications (seit 2016)
- Sprecher des SFB/TRR 154 „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken“ (seit 2014)
- Co-Editor der EMS-Buchreihe, Industrial and Applied Mathematics (seit 2013)
- Associate Editor, Vietnam Journal of Mathematics (seit 2011)
- Mitglied des Advisory Boards, EURO Journal on Computation Optimization (seit 2011)
- Bereichsleiter von Optimization Online, www.optimization-online.org (seit 2010)
- Associate Editor, Discrete Optimization (von 2009 bis 2018)
- Associate Editor, Mathematical Programming C (von 2008 bis 2020)
- Ehrenamtliches Mitglied des BMBF Beirates Mathematik (seit 2007)

Die Arbeit von Mitarbeitern im Projekt Energiemarktdesign wurden im Jahr 2020 mit folgenden Preisen ausgezeichnet:

- **Johannes Wirth.** Energiepreis des EnCN e.V. für seine Bachelorarbeit „Möglichkeiten der CO₂-Bepreisung in Europa in Ergänzung zum EU-ETS“. 14.12.2020.

Im Bereich Energiemarktdesign waren im Jahr 2020 folgende Personen zu Gast:

- Prof. Dr. Marta Villar Ezcurra, Universidad CEU San Pablo Madrid. FAU-SET: Seminar on Environmental Taxation, 08.01.2020

Selektive Medienpräsenz:

Frankfurter Allgemeine Zeitung:

- <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/veronika-grimm-ist-neue-wirtschaftsweise-und-energie-expertin-16731094.html>
- <https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/gesundheit/coronavirus/wirtschaftsweise-gruener-systemwechsel-nach-coronakrise-16819052.html>

Spiegel:

- <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/klimaschutz-verschleppt-wirtschaftsweise-veronika-grimm-kritisiert-industrie-a-7bec73e3-8f60-4c61-9022-53d778e8e2a6>

Handelsblatt:

- <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/analyse-serie-global-challenges-veronika-grimm-ein-globaler-klub-der-willigen-koennte-den-klimawandel-aufhalten/26678382.html>
- <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/energie/klimaneutralitaet-als-industriepolitische-chance/>

Tagesspiegel:

- <https://www.tagesspiegel.de/politik/global-challenges-die-wertschoepfung-wird-neu-geordnet/26228980.html>

Weitere:

- <https://www.energate-messenger.de/news/206078/wirtschaftsweise-grimm-fordert-reformen-fuer-wasserstoffhochlauf>
- https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/01/24/la-protection-du-climat-est-une-opportunite-pour-renforcer-la-cohesion-europeenne_6067440_3234.html
- <https://www.cleanenergywire.org/news/europe-must-take-ambitious-lead-green-hydrogen-german-govt-advisor>
- <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/hydrogen-trade-hopes-boosted-by-australia-germany-deal/>

6 Vorträge & Poster 2020

- [1] V. Grimm. The future of energy systems and implications for energy policy. Congress-Bundestagsforum der Allbright Stiftung in Elmau, 18.02.2020
- [2] V. Grimm. Der Weg aus dem Corona-Shutdown. Eine risikoadaptierte Strategie. IMFS Seminar, 16.04.2020
- [3] V. Grimm. The Way out of the Corona Shutdown: A risk adapted Strategy. New Economic Forum, 22.04.2020
- [4] J. Thürauf. A Mathematical Challenge: Bookings and Technical Capacities in the European Entry-Exit Gas Market. Energy Seminar Edinburgh, 07.05.2020
- [5] V. Grimm. Hydrogen Production and Import under different Regulatory Frameworks. European Sciences Advisory Council Workshop on Hydrogen, 28.05.2020
- [6] F. Liers. Robust Treatment of Energy Problems. Energy Seminar Edinburgh, 03.06.2020
- [7] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. dena Kolloquium, 05.06.2020
- [8] V. Grimm. Wirtschaftlichen Auswirkungen von Corona - wie kommen wir innovativ und nachhaltig aus dieser Krise? Wirtschaftsbeirat der Grünen Bundestagsfraktion, 08.06.2020
- [9] V. Grimm. Coronexit: nachhaltige Wege aus der Krise. SPD-Bundestagsfraktion, 10.06.2020
- [10] S. Kretschmer. Market Design for Renewable Energy Auctions: An Analysis of Alternative Auction Formats. EAERE 2020, 25.06.2020
- [11] J. Egerer. The impact of neighboring markets on renewable locations, transmission expansion, and generation investment. 25th EAERE Annual Conference, 26.06.2020
- [12] J. Egerer. Modellierung regionaler Investitionen in Erzeugung und Übertragungsnetze. Bürgerdialog Stromnetze, Regionalnetzwerktreffen Franken online, 30.06.2020
- [13] C. Sölch. Economic comparison of electric fuels. ESM meets FAU - Hydrogen Economy (Workshop mit Siemens), 30.06.2020
- [14] V. Grimm. Hydrogen – Perspectives in Germany. EAERE Conference, 02.07.2020
- [15] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für unsere Arbeitsplätze. IAD-H2.B Workshop, 06.07.2020
- [16] S. Kretschmer. Green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. Vortrag bei der sonnen AG, 07.07.2020
- [17] J. Egerer. Kurz- und mittelfristige Anreize durch regionale Flexibilitätsmärkte im deutschen Stromsektor. Seminar Energiemärkte mit der N-Ergie, 11.07.2020
- [18] J. Grübel. On Electricity Market Equilibria with Storage: Modeling, Uniqueness, and a Distributed ADMM. ALOP-Colloquium (Universität Trier), 13.07.2020
- [19] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. Lions Club Meistersinger Nürnberg, 23.07.2020
- [20] V. Grimm. Zonale Preisgestaltung und alternative Maßnahmen zur Verringerung von strukturellen Engpässen im Stromnetz. Umweltministeriums Baden-Württemberg, 27.07.2020
- [21] V. Grimm. Klausurtagung der Bundestagsfraktion der Grünen. Update zur Konjunktur und zu wirtschaftspolitischen Fragen, Berlin, 02.09.2020
- [22] V. Grimm. Pressegespräch zur EEG-Umlage mit Vertreter:innen der CDU und der SPD Bundestagsfraktion, Vortrag „Klimaschutz als Industriepolitische Chance“, 07.09.2020
- [23] V. Grimm. Handelsblatt Tagung Asia Business Insights “Globale Lieferketten und die Corona-Pandemie“, Düsseldorf, 08.09.2020
- [24] V. Grimm. Herbstklausur der Freien Wähler, Konjunkturupdate, München, 09.09.2020
- [25] V. Grimm. CDU Wirtschaftsrat „Klimaschutz als Industriepolitische Chance“, 14.09.2020
- [26] V. Grimm. Clean Energy Wire, online Seminar „Climate Protection for European key industries“, 14.09.2020
- [27] V. Grimm. Klausurtagung der Fraktion Die GRÜNEN des bayerischen Landtags, Konjunkturupdate und Diskussion zum Klimaschutz, Regensburg, online Zuschaltung, 17.09.2020
- [28] V. Grimm. Parlamentarische Frühstück, Berlin „Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit“, Berlin, 17.09.2020

- [29] V. Grimm. Unternehmensgrün „Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit“, Berlin, 17.09.2020
- [30] S. Kretschmer. Market Design for Renewable Energy Auctions: An Analysis of Alternative Auction Formats. Verein für Sozialpolitik Jahrestagung 2020, 28.09.2020
- [31] V. Grimm. ZEIT für Wissen, online-Konferenz. Gespräch mit der ZEIT-Journalistin Pia Pinzler zum Thema Nachhaltigkeit
- [32] V. Grimm. Forum New Economy „German ideology and the refoundation of Europe“ Vortrag und Diskussion mit Moritz Schularik und Thomas Piketty
- [33] V. Grimm. German Japanese Fuel Cell Conferenc “Introduction to H2.B and Hydrogen Alliance Bavaria”, 11.11.2020
- [34] V. Grimm. Übergabe des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung an die Bundeskanzlerin, 11.11.2020
- [35] V. Grimm. Impuls auf dem Parteitag der Grünen, 12.11.2020
- [36] V. Grimm. Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, online an der WiSo, 12.11.2020
- [37] V. Grimm. Dena-Kongress, Eröffnungspanel mit Hildegard Müller, VDA, Christian Buch, Siemens Energy, Kerstin Andrae, BDEW, 16.11.2020, Berlin
- [38] V. Grimm. Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Einladung der Bayerischen Landesvertretung in Berlin, 17.11.2020
- [39] V. Grimm. Hydrogen Dialogue „Klimaschutz als Industriepolitische Chance“, Nürnberg 18.11.2020
- [40] V. Grimm. Chinesisch-Deutsche Wirtschaftskonferenz RSBK, „Klimaschutz als Industriepolitische Chance“, 25.11.2020
- [41] V. Grimm. ISWA Seminar auf Einladung des BDI „Klimaschutz als Industriepolitische Chance: Wasserstoff und Synfuels“, 08.12.2020
- [42] V. Grimm. EnCN Jahrestagung, „Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats, Klimaschutz als Industriepolitische Chance“, 14.12.2020
- [43] L. Lang. Smart Markets als marktbasierter Ergänzung zum Redispatch. Interne EnCN Konferenz, 14.12.2020
- [44] V. Grimm. Konferenz Israel and the EU: Recovery through the Green Deal? Vortrag und Diskussion, 16.12.2020

7 Gutachten

- [G1] Konjunkturprognose 2020 und 2021. Sachverständigenrat zur Begutachtung der Gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Wiesbaden, Juni 2020.
- [G2] Corona-Krise gemeinsam bewältigen, Resilienz und Wachstum stärken. Jahresgutachten 2020/21. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Wiesbaden, November 2020.
- [G3] Study on the possibility to set up a Carbon Border Adjustment Mechanism on Selected Sectors - Design and effects. Im Auftrag der Europäischen Kommission (DG TAXUD). Brüssel, 2020.
- [G4] Klimaschutz vorantreiben, Wohlstand stärken – Kommentierung zentraler Handlungsfelder der deutschen Energiewende im europäischen Kontext. Kommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, Münster, Nürnberg, Stuttgart, Juni 2020.
- [G5] Öffentliche Infrastruktur in Deutschland: Probleme und Reformbedarf. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, Juni 2020.
- [G6] Nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion ermöglichen. Empfehlungen für die Verbraucherpolitik. Veröffentlichung des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen beim Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Berlin, Juli 2020.

8 Veröffentlichungen

- [1] Grimm V.; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2016). Transmission and generation investment in electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. *European Journal of Operational Research*, Bd. 254, S. 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.044>
- [2] Runge P.; C. Sölch; J. Albert; P. Wasserscheid; G. Zöttl; V. Grimm (2019). Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy*, Bd. 233–234, S. 1078–1093. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.023>
- [3] Ismer R.; M. Haußner; K. Meßerschmidt; K. Neuhoff (2019). Sozialverträglicher CO₂-Preis: Vorschlag für einen Pro-Kopf-Bonus im Rahmen des Krankenversicherungssystems. *Zeitschrift für Umweltrecht ZUR*, 664–675.
- [4] Ismer R. (2020). A Union that Strives for More Also in the Area of Taxation: Tax Measures in the Incoming Commission’s Political Guidelines. *EC Tax Review*, Bd. 29, S. 2–5.
- [5] Ambrosius M.; V. Grimm; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2020). Endogenous price zones and investment incentives in electricity markets: An application of multilevel optimization with graph partitioning. *Energy Economics*, Bd. 92, 104879. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104879>
- [6] Grimm V.; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). Optimal price zones in electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches. *Optimization Methods & Software*, Bd. 34 (2), S. 406–436. <https://doi.org/10.1080/10556788.2017.1401069>
- [7] Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2021). The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. *Energy Economics*, Bd. 93. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104934>
- [8] Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2019). Regionally differentiated network fees to affect incentives for generation investment. *Energy*, Bd. 177, S. 487–502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.035>
- [9] Bichler M.; V. Grimm; S. Kretschmer; P. Sutterer (2020). Market design for renewable energy auctions: An analysis of alternative auction formats. *Energy Economics*, Bd. 92, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104904>
- [10] Ambrosius M.; J. Egerer; V. Grimm; A.H. van der Weijde (2020). Uncertain bidding zone configurations: The role of expectations for transmission and generation capacity expansion. *European Journal of Operational Research*, Bd. 285, S. 343–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.024>
- [11] Grübel J.; T. Kleinert; V. Krebs; G. Orlinskaya; L. Schewe; M. Schmidt; J. Thürauf (2020). On electricity market equilibria with storage: Modeling, uniqueness, and a distributed ADMM. *Computers & Operations Research*. Bd. 114, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104783>
- [12] Egerer J.; V. Grimm; T. Kleinert; M. Schmidt; G. Zöttl (2020). The impact of neighboring markets on renewable locations, transmission expansion, and generation investment. *European Journal of Operational Research*. Online first. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.10.055>
- [13] Kleinert T.; M. Schmidt (2020). Computing Feasible Points of Bilevel Problems with a Penalty Alternating Direction Method. *INFORMS Journal on Computing*. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2019.0945>
- [14] Kleinert T.; M. Labbé; F. Plein; M. Schmidt (2020). Technical Note—There’s No Free Lunch: On the Hardness of Choosing a Correct Big-M in Bilevel Optimization. *Operations Research*. Bd. 68, S. 1716–1721. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1944>
- [15] Kleinert T.; M. Schmidt (2019). Global optimization of multilevel electricity market models including network design and graph partitioning. *Discrete Optimization*, Bd. 33, S. 43–69. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2019.02.002>
- [16] Kleinert T.; M. Labbé; F. Plein; M. Schmidt (2020). Closing the gap in linear bilevel optimization: a new valid primal-dual inequality. *Optimization Letters*. <https://doi.org/10.1007/s11590-020-01660-6>
- [17] Lang L.M.; B. Dallinger; G. Lettner (2020). The meaning of flow-based market coupling on redispatch measures in Austria. *Energy Policy*, Bd. 136, 111061. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111061>

- [18] Grimm V.; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). A multilevel model of the European entry-exit gas market. *Mathematical Methods of Operations Research*, Bd. 89 (2), S. 223–255. <https://doi.org/10.1007/s00186-018-0647-z>
- [19] Labbé M.; F. Plein; M. Schmidt; J. Thürauf (2021). Deciding feasibility of a booking in the European gas market on a cycle is in P for the case of passive networks. *Networks*. <https://doi.org/10.1002/net.22003>
- [20] Labbé M.; F. Plein; M. Schmidt (2019). Bookings in the European Gas Market: Characterisation of Feasibility and Computational Complexity Results. *Optimization and Engineering*, Bd. 21, S. 305–334. <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09447-0>
- [21] Schewe L.; M. Schmidt; J. Thürauf (2019). Structural Properties of Feasible Bookings in the European Entry-Exit Gas Market System. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research*. Online first, S. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10288-019-00411-3>
- [22] Schewe L.; M. Schmidt; J. Thürauf (2020). Computing technical capacities in the European entry-exit gas market is NP-hard. *Annals of Operations Research*, Bd. 295, S. 337–362. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03725-2>
- [23] Kleinert T.; V. Grimm; M. Schmidt (2021). Outer Approximation for Global Optimization of Mixed-Integer Quadratic Bilevel Problems. *Mathematical Programming (Series B)*. Im Erscheinen.
- [24] Liers F.; L. Schewe; J. Thürauf (2021). Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems. *INFORMS Journal on Computing*. Im Erscheinen.
- [25] Burlacu R.; H. Egger; M. Groß; A. Martin; M. Pfetsch; L. Schewe; M. Sirvent; M. Skutella (2019). Maximizing the storage capacity of gas networks: a global minlp approach. *Optimization and Engineering*, Bd. 20, S. 543–573, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9414-5>
- [26] Grimm V.; J. Grübel; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. *European Journal of Operational Research*, Bd. 273 (3), S. 1097–1108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.016>
- [27] Kufner T.; G. Leugering; A. Martin; J. Medgenberg; J. Schelbert; L. Schewe; M. Stingl; C. Strohmeier; M. Walther (2019). Towards a lifecycle oriented design of infrastructure by mathematical optimization. *Optimization and Engineering*, Bd. 20, S. 215–249. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9406-5>
- [28] Grimm V.; S. Kretschmer; S. Mehl (2020). Green innovations: The organizational setup of pilot projects and its influence on consumer perceptions. *Energy Policy*. Bd. 142, 111474. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111474>
- [29] Grimm V.; J. Grübel; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2020). Storage investment and network expansion in distribution networks: The impact of regulatory frameworks. *Applied Energy*. Bd. 262, 114017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114017>
- [30] Bohlayer, M.; A. Bürger; M. Fleschutz; M. Braun; G. Zöttl (2020). Multi-period investment pathways - Modeling approaches to design distributed energy systems under uncertainty. *Applied Energy*. Bd. 285, 116368. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116368>

Preprints und eingereichte Arbeiten:

- [31] Egerer, J., V. Grimm; J. Grübel; G. Zöttl (2021). Long-run market equilibria in coupled energy sectors: A study of uniqueness. *SSRN Electronic Journal*.
- [32] Runge P.; C. Sölch; J. Albert; P. Wasserscheid; G. Zöttl; V. Grimm (2020). Economic Comparison of Electric Fuels Produced at Excellent Locations for Renewable Energies: A Scenario for 2035. *SSRN Electronic Journal*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3623514>
- [33] Ismer R.; K. Neuhoff; A. Pirlot (2020). Border Carbon Adjustments and Alternative Measures for the EU ETS: An Evaluation. *DIW Discussion Paper*. Bd. 1855. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.743698.de/dp1855.pdf
- [34] Garnadt N.; V. Grimm; W.H. Reuter (2020). Border carbon adjustment: Empirics, design and caveats, Arbeitspapier, Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden.

- https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Arbeitspapiere/Arbeitspapier_11_2020.pdf
- [35] Ambrosius M.; V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2019). Data Documentation for the German Electricity Market used for the calibration of the GATE Model - NDP 2025 (Version 2015). SSRN Electronic Journal. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3365830>
- [36] Grimm V., A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2020). Market-Based Redispatch May Result in Inefficient Dispatch. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3120403>
- [37] Ambrosius M.; J. Egerer; V. Grimm; A.H. van der Weijde (2020). Risk Aversion in Multilevel Electricity Market Models With Different Congestion Pricing Regimes. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3541599>
- [38] Krebs V.; M. Schmid (2019). Γ -Robust Linear Complementarity Problems. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/03/7107.html
- [39] Krebs V.; M. Müller; M. Schmid (2019). Gamma-Robust Linear Complementarity Problems with Ellipsoidal Uncertainty Sets. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/10/7434.html
- [40] Aigner, K.-M.; R. Burlacu; F. Liers; A. Martin (2020). Solving AC Optimal Power Flow with Discrete Decisions to Global Optimality. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/08/7981.html
- [41] Aigner, K.-M.; J.-P. Clarner; F. Liers; A. Martin (2020). Robust Approximation of Chance Constrained DC Optimal Power Flow under Decision-Dependent Uncertainty. *TRR 154 Working Paper*. https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/files/312/robust_approximation_dc_opf.pdf
- [42] Kleinert T.; M. Schmidt (2020). Why there is no need to use a big-M in linear bilevel optimization: A computational study of two ready-to-use approaches. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/10/8065.html
- [43] Thürauf, J. (2020). Deciding the Feasibility of a Booking in the European Gas Market is coNP-hard. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/05/7803.html
- [44] Grimm V.; D. Novak; L. Schewe; M. Schmidt; A. Schwartz; G. Zöttl (2020). A Tractable Multi-Leader Multi-Follower Peak-Load-Pricing Model with Strategic Interaction. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/07/7913.html
- [45] Böttger, T; V. Grimm; T. Kleinert; M. Schmidt (2020). The Cost of Decoupling Trade and Transport in the European Entry-Exit Gas Market. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/06/7851.html
- [46] Schewe, L.; M. Schmidt; J. Thürauf (2020). Global Optimization for the Multilevel European Gas Market System with Nonlinear Flow Models on Trees. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/08/7973.html
- [47] Biefel, C.; F. Liers; J. Rolfes; M. Schmidt (2020). Affinely Adjustable Robust Linear Complementarity Problems. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2020/08/7966.html
- [48] Liers F.; A. Martin; M. Merkert; N. Mertens; D. Michaels (2020). Towards the Solution of Mixed-Integer Nonlinear Optimization Problems using Simultaneous Convexification. <https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/frontdoor/index/index/searchtype/latest/docId/303/start/0/rows/10>
- [49] Grimm V.; G. Orlinskaya; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). Optimal Design of Retailer-Prosumer Electricity Tariffs Using Bilevel Optimization. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/07/7297.html

Dissertationen:

- [50] Dr. Mirjam Ambrosius: Designing Sustainable Energy Systems: An Analysis of Different Market Configurations with Zonal Pricing via Multilevel Optimization (Erstbetreuerin: Prof. Dr. Veronika Grimm)
- [51] Dr. Julia Bellenbaum: On the Economics of Reliability in Electric Power Systems with High Shares of Renewables (Zweitbetreuerin: Prof. Dr. Veronika Grimm)

- [52] Dr. Markus Bohlayer: Investment and Operating Strategies for Distributed Energy Systems: Model-Based Assessment of Integrated Energy Systems, Market Opportunities, and Uncertainty (Erstbetreuer: Prof. Dr. Gregor Zöttl, Zweitbetreuer: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Marco Braun)
- [53] Dr. Sandra Bystricky: A temporal decomposition approach of energy systems models using langrangian relaxation. (Erstbetreuer: Prof. Dr. Alexander Martin, Zweitbetreuerin: Prof. Dr. Frauke Liers)
- [54] Dr. Thomas Kleinert: Algorithmic techniques for solving mixed-integer multilevel models in energy marked design. (Erstbetreuer: Prof. Dr. Alexander Martin, Zweitbetreuer: Prof. Martin Schmidt)
- [55] Dr. Katja Kutzer: Using Piecewise Linear Approximation Techniques to Handle Bilinear Constraints with Applications to Off-Grid Hybrid Energy Systems. (Erstbetreuer: Prof. Dr. Alexander Martin)

9 Ausgerichtete Workshops

- [1] EnCN-Jahreskonferenz 2020, Nürnberg, 14.12.2020

10 Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten

Lehrveranstaltungen an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg:

- Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2020
- Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2020
- Vorlesung Numerical Aspects of Linear and Integer Programming. Prof. Dr. Alexander Martin. Sommersemester 2020
- Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2020/2021
- Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2020/2021
- Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Mathematical Optimization for Communications & Signal Processing. Prof. Dr. Frauke Liers. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021
- Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021

Betreute Bachelorarbeiten:

- Bewertung verschiedener Speichertechnologien in erneuerbaren Strommärkten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- Die Akzeptanz von Windenergieanlagen – NIMBY, Nocebo und Beteiligungsmöglichkeiten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- Mobilitätswende zum Erreichen der Klimaziele im Verkehrssektor – Bewertung von wasserstoff- und batterieelektrischen Mobilitätskonzepten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- Geschäftsmodelle für Photovoltaiksysteme mit Batteriespeicher für kleine Industriebetriebe. Prof. Dr. Veronika Grimm
- A Carbon Tax for Europe? Prof. Dr. Roland Ismer

- Greening the German Income Tax Act. Prof. Dr. Roland Ismer
- Revising the EU Energy Taxation Directive. Prof. Dr. Roland Ismer
- Industry Exemptions under Carbon Pricing Schemes. Prof. Dr. Roland Ismer
- The EU New Green Deal: Border Carbon Adjustments. Prof. Dr. Roland Ismer
- Bewertung verschiedener Speichertechnologien in erneuerbaren Strommärkten. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- Aktuelle Entwicklungen im Deutschen Regelenergiemarkt. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- Ansätze und Beispiele der Implementierung einer CO₂-Steuer. Prof. Dr. Gregor Zöttl

Betreute Masterarbeiten:

- The value of flexibility in industrial electricity demand – A model-based evaluation for the German electricity market. Prof. Dr. Veronika Grimm
- Techno-Ökonomische Analyse zur Einsatzoptimierung von wasserstoff- und batterieelektrischen Bussen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- Ein mehrstufiges Modell zur Analyse von robustheitsbedingten Ineffizienzen im europäischen Entry-Exit-Gasmarkt. Prof. Dr. Frauke Liers
- Optimierung über Entscheidungsbäumen - Mit Anwendung auf die Stabilität von Gleichstromnetzen. Prof. Dr. Frauke Liers
- Solving Mixed-Integer Problems using Machine Learning for the Optimization of Energy Production. Prof. Dr. Alexander Martin
- Presolve-Verfahren für Lineare Bilevelprobleme. Prof. Dr. Alexander Martin
- Optimization models for adaptive energy supply in critical infrastructures during power outages. Prof. Dr. Alexander Martin
- CO₂-Bepreisung und Vermeidung von Carbon Leakage. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- Alternative drives: Vehicle purchase decisions under different market design scenarios. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- Aufbau eines statischen Modells zur Vertifikation der Kapazität für das Flow-Based Day-Ahead Market Coupling. Prof. Dr. Gregor Zöttl

FORSCHUNGSBEREICH

Erneuerbare Energien



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Christoph 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/EET

EE-Technologien im urbanen Umfeld – EET

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU LS für Werkstoffwissenschaften - Prof. Dr. Christoph J. Brabec FAU LS für Werkstoffwissenschaften - Prof. Dr. Wolfgang Heiss FAU LS für Werkstoffwissenschaften - Dr. Thomas Heumüller ZAE - Prof. Dr. Christoph J. Brabec ZAE - Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf	TP1: 2D- und 3D-Freiform Beschichtungsprozesse zur Herstellung von PV-Elementen für das urbane Umfeld TP2: Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse TP3: Smarte und schaltbare Fenster TP4: Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld

Projektbericht 2020

Spätestens mit dem vom ZAE Bayern aufgestellten Effizienz-Weltrekord für organische Solarmodule [1] hat sich die lösungsprozessierte organische Photovoltaik (OPV) als ernstzunehmende PV-Technologie etabliert. Die OPV ist für den urbanen Raum eine attraktive Alternative zur derzeit marktbeherrschenden Si-PV-Technologie. Aufgrund ihrer einzigartigen Vorteile wie kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung, kurze Energierücklaufzeit, sowie der Verfügbarkeit flexibler, leichter und semitransparenter PV-Module ermöglicht die OPV einzigartige Anwendungen, von tragbaren Ladegeräten bis zur Gebäudeintegration (Abbildung 1). Die Teilprojekte des Projekts EET widmen sich der Aufgabe, skalierbare Produktionsverfahren für gedruckte PV weiterzuentwickeln und neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Im **Projektteil TP1 – 2D und 3D Beschichtungstechnologien (Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf)** werden an der „Solarfabrik der Zukunft“ Beschichtungstechnologien für die Herstellung von PV-Modulen mit hoher Variabilität hinsichtlich Form, Farbe und Muster entwickelt.

Im **Projektteil TP2 – zerstörungsfreie bildgebende Analyse (Dr. Thomas Heumüller, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden neue bildgebende optische Verfahren zur inline Qualitätskontrolle von PV-Modulen entwickelt.

Im **Projektteil TP3 – smarte und schaltbare Fenster (Prof. Dr. Wolfgang Heiss)** werden smarte Materialien für die Herstellung von spektral schaltbaren Fenster entwickelt, die dann im TP4 verdruckt und getestet werden.

Im **Projektteil TP4 – Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld (PD Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden auf Basis der in TP1 und TP2 erarbeiteten Technologien Verfahren für den Rolle-zu-Rolle-Druck von PV-Modulen entwickelt und die Module auf ihre Eignung für die Gebäudeintegration untersucht.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR
Prof. Dr. Christoph Brabec

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung



E-Mail
Christoph.brabec@encn.de

Telefon
+49 9131 9398 100



Abbildung 1: Anwendungen für gedruckte Photovoltaik in Textilien, Fahrzeugen und Gebäuden.
(Copyright Grafik: M. Neberich)

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

1.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: ZAE Bayern

Leitung: Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf (ZAE)

1.2 Arbeiten und Ergebnisse

1.2.1 Perowskit-Module

Während der Effizienz-Weltrekord bei Perowskit-Solarzellen (PSCs) bereits bei 26% liegt, konnten bei vollständig lösungsprozessierten PSCs lediglich ca. 16% erreicht werden (Abbildung 2a). Wir berichten hier über die Herstellung vollständig gedruckter, kosteneffizienter, stabiler und effizienter PSCs in Umgebungsluft, wie sie für einen industriellen, skalierbaren Prozess erforderlich ist. Alle Schichten der PSCs, einschließlich der Elektronentransportschicht (ETL), der photoaktiven Schicht, der Lochtransportschicht (HTL) und der Deck-Elektrode werden durch Rakeln hergestellt. ETL und HTL sowie die Deck-Elektrode basieren auf stabilen Materialien, die kostengünstig und in großen Mengen verfügbar sind. Um ein vielversprechendes Konzept für die industrielle Produktion von PSCs zu entwickeln, haben wir uns für eine bei niedriger Temperatur prozessierbare, Rolle-zu-Rolle (R2R)-kompatible, vollständig gedruckte planare n-i-p-Bauelementarchitektur mit einem einfachen, aber zuverlässigen Kristallisationsprotokoll für die Abscheidung des Perowskitfilms entschieden. Die Architektur des Bauteils ist in Abbildung 2b dargestellt. Als ETL dient eine Schicht aus SnO₂-Nanopartikeln. Für die HTL wird das üblicherweise verwendete, aber instabile (2,2',7,7'-Tetrakis-(N,N-di-p-methoxyphenylamin)-9,9'-Spirobifluoren) (Spiro-MeOTAD) durch eine Doppelschicht ersetzt, die aus Poly[(4,4'-bis(2-butyloctyoxycarbonyl)-[2,2'-bithiophen]-5,5'-diyl)-alt-(2,2'-bithiophen-5,5'-diyl)] (PDCBT), Poly(3-hexylthiophen-2,5-diyl) (P3HT) und

Tantal-dotiertem Wolframoxid (Ta-WOx) besteht. Die Perowskit-Schicht wird im Luftstrom aufgerakelt, wie in Abbildung 2c dargestellt. Durch die Zugabe von Guanidinium-(CH₆N₃⁺)-Chlorid (GACl) als Additiv in die Perowskit-Vorläuferlösung wird die Morphologie des Perowskit-Films durch Erhöhung der Korngröße und Verringerung der Fallendichte stark verbessert.

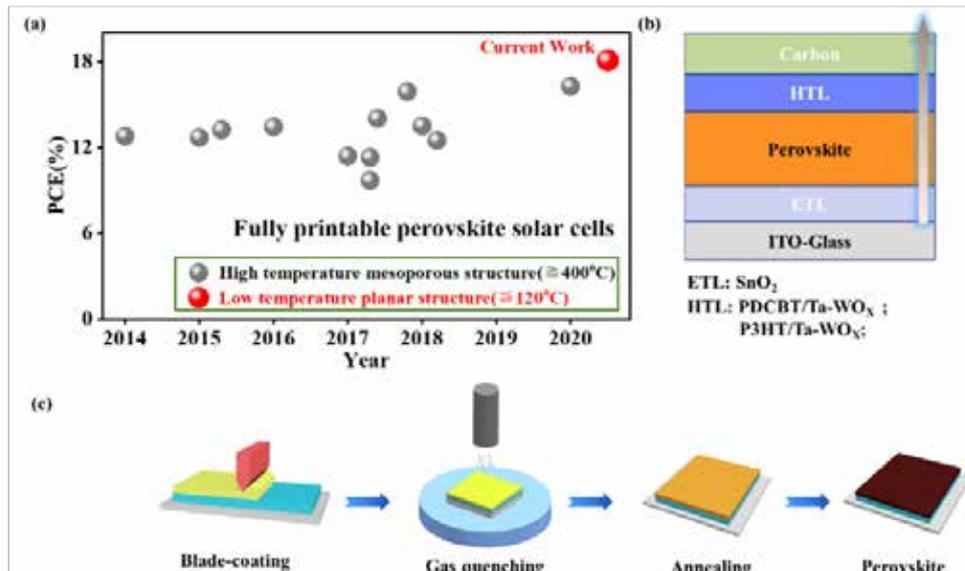


Abbildung 2: (a) Effizienzen vollständig lösungsprozessierter Perowskit-Solarzellen als Funktion des Jahres der Veröffentlichung. (b) Architektur der in dieser Arbeit verwendeten Perowskit-Solarzellen. (c) Schematische Darstellung der Abscheidung eines Perowskitfilms mittels Rakelbeschichtung im Luftstrom.

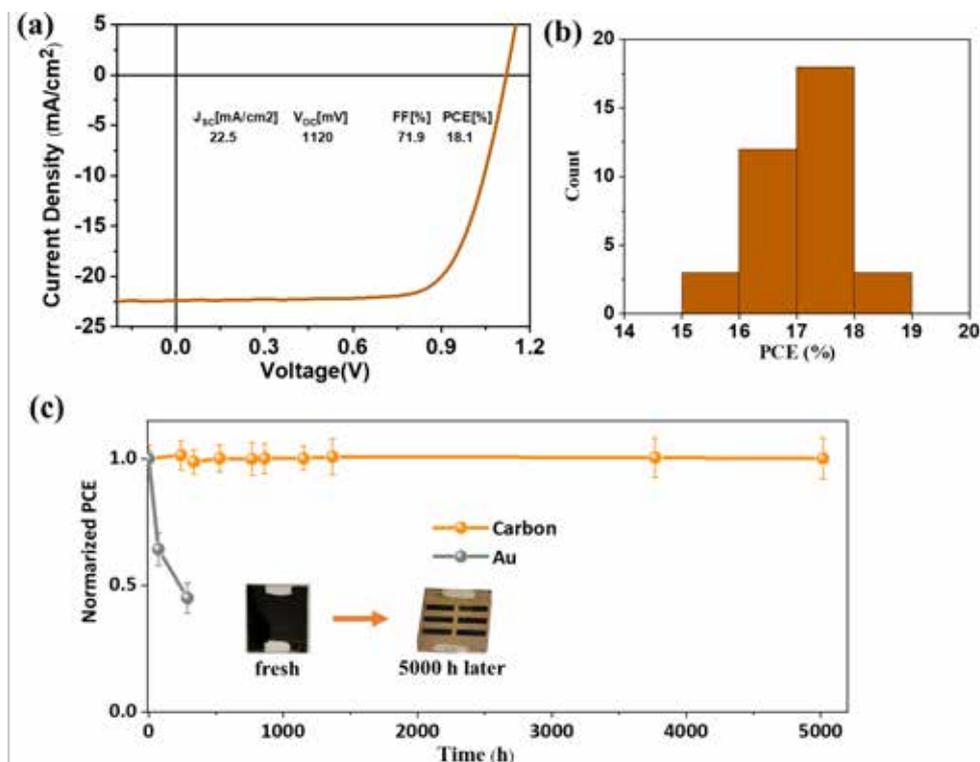


Abbildung 3: (a) Stromdichte-Spannungs (J - V)-Kurve und (b) Effizienzstatistik von Solarzellen der Struktur ITO/SnO₂/MA_{0,9}GA_{0,1}PbI₃/P3HT/Ta-WO_x/C. (c) Stabilitätsmessungen nicht verkapselter MA_{0,9}GA_{0,1}PbI₃ Solarzellen mit Gold- und Kohlenstoff-Deckelektroden in feuchter Luft. Die Photographien im Diagramm zeigen Perowskit-Solarzellen mit Kohlenstoff-Deckelektroden vor und nach 5000 Stunden Lagerung in feuchter Atmosphäre.

PSCs mit planarer Struktur auf Basis von $\text{MA}_{0,9}\text{GA}_{0,1}\text{PbI}_3$ zeigen Effizienzen von bis zu 16,2 % bei gleichzeitig hoher Stabilität. P3HT wurde aufgrund seiner inhärent guten Umweltstabilität, seiner geringen Kosten und seiner einfachen Herstellung, die zusammen die Anforderung eines Druckprozesses erfüllen, häufig in PSCs als HTL verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3a dargestellt. Durch den Einbau von P3HT in die vollständig gedruckten PSCs wurde der Füllfaktor (FF) der PSCs auf 71,9 % verbessert und eine stabile Leerlaufspannung (V_{oc}) von 1,12 V erreicht, was zu einer beeindruckend hohen Effizienz von 18,1 % führt. Dies ist der derzeit höchste Wirkungsgrad für vollständig lösungsprozessierte PSCs (Abbildung 2a). Diese Effizienz zeigt eine hohe Reproduzierbarkeit (Abbildung 3b) und Langzeitstabilität (Abbildung 3c).

Auf dieser Basis wurden sodann großflächig druckbare, hocheffiziente Perowskit-Module der Architektur ITO/SnO₂/Perowskit/HTL/Kohlenstoff durch kombinatorische Optimierung der Perowskit-Morphologie und der Zwischenschichten hergestellt. Durch die Optimierung der Laserparameter für die Strukturierung des Moduls die SnO₂-Schicht fast vollständig entfernt werden, ohne die ITO-Bodenelektrode zu zerstören (Abbildung 4a-c). Durch die Kombination aller Maßnahmen wurde ein Perowskit-Modul mit einer stabilen Effizienz von 16,4 % erzielt (Abbildung 4d,e).

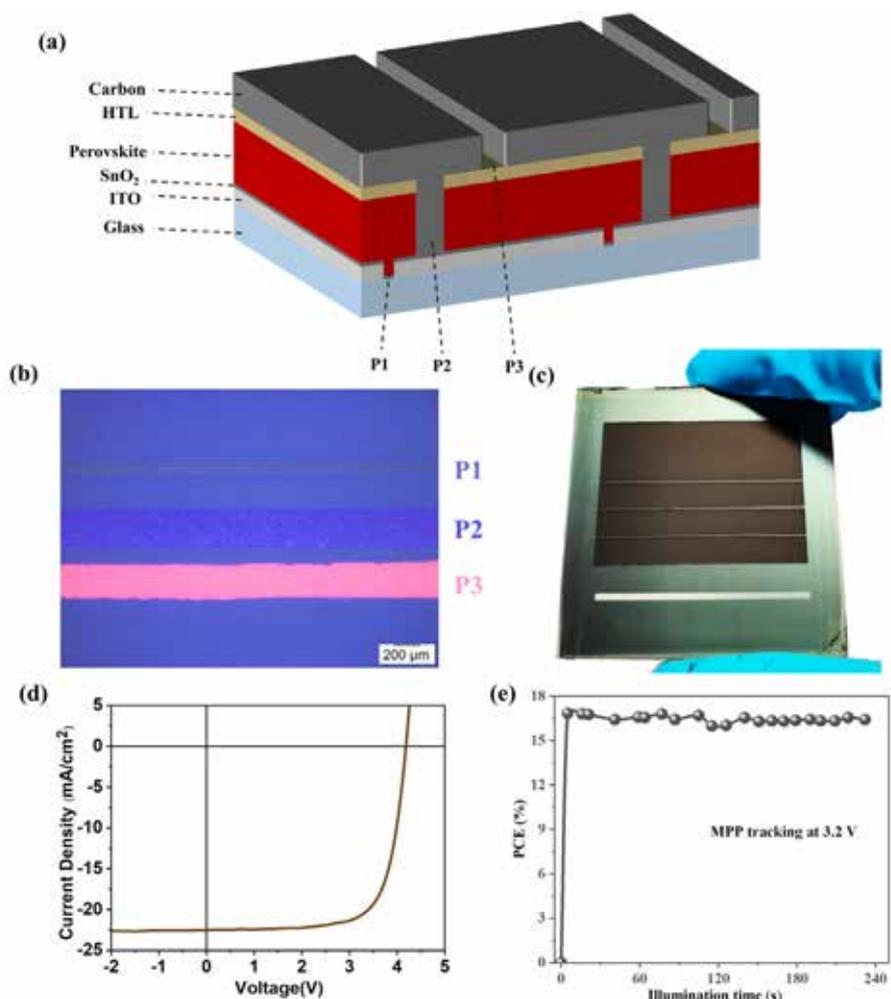


Abbildung 4: (a) Schematische Darstellung eines Perowskit-Solarmoduls mit Kohlenstoff-Elektrode. Mikroskopaufnahmen der P1-, P2- und P3-Laserlinien (b) sowie die Photographie (c) eines planaren Perowskit-Solarmoduls mit einem geometrischen Füllfaktor von 50%. J-V-Kurven (d) und Arbeitspunkt-Verfolgung (e) des besten Perowskit-Solarmoduls.

1.2.2 Funktionalisierung dreidimensionaler Objekte mit gedruckter (Opto-)Elektronik

Ein großer Vorteil der gedruckten Elektronik ist die Möglichkeit, Bauelemente wie organische Solarzellen, Photodetektoren oder organische Leuchtdioden (OLEDs) auf nahezu beliebige Substrate aufzubringen. Durch Methoden aus dem Bereich des Digitaldrucks können somit beliebige Designs, Formen und auch Farben realisiert werden. Da der Digitaldruck optoelektronischer Bauteile auch direkt auf bestehende 3D Bauteile erfolgen kann, ergeben sich insbesondere im Bereich der Automobil-, Medizin- und Energietechnik entscheidende Vorteile bei der Realisierung neuer Anwendungen und der Verringerung von Produktionskosten. Im AiF-geförderten Forschungsprojekt OLE3D bündeln das ZAE Bayern und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der FAU ihre Kompetenzen, um durch die Kombination von Robotik, Tintenstrahl- und Aerosoljet-Druck von organischen Solarzellen und organischen Leuchtdioden sowie der „Surface mounted technology“ hochleistungsfähige Hybridbauteile herzustellen. Im Jahr 2019 wurde in Zusammenarbeit mit der Neotech GmbH der Aufbau des 5-Achs-Roboters mit integrierter Tintenstrahl Druckeinheit abgeschlossen (Abbildung 6, links). Im Jahr 2020 wurden mit Hilfe dieses Systems 3D-Objekte des Typs „MIDster“ mit einzeln ansteuerbaren OLEDs bedruckt (Abbildung 5, rechts). Dazu wurden zuerst Elektroden aus Silbernanopartikeln aufgebracht, die bereits bei Sintertemperaturen von 120 °C Flächenwiderstände von 3 Ohm/□ erreichen und damit eine schonende Metallisierung auch empfindlicher Flächen ermöglichen. Als Elektroneninjektionsschicht wurde eine Schicht aus ZnO-Nanopartikeln aufgedruckt, gefolgt von der aktiven Schicht aus dem kommerziell erhältlichen Polymer „Super Yellow“ und einer Löcherinjektionsschicht aus PEDOT:PSS FHC. Die Deckelektrode wurde durch Aufdrucken einer Silbernanodraht-Suspension hergestellt, so dass sich eine Transmission der resultierenden Elektrode von ca. 90% ergibt. Das Projekt wurde somit erfolgreich abgeschlossen. Folgeprojekte zur drucktechnischen Verkapselung der Bauteile sind in Beantragung.

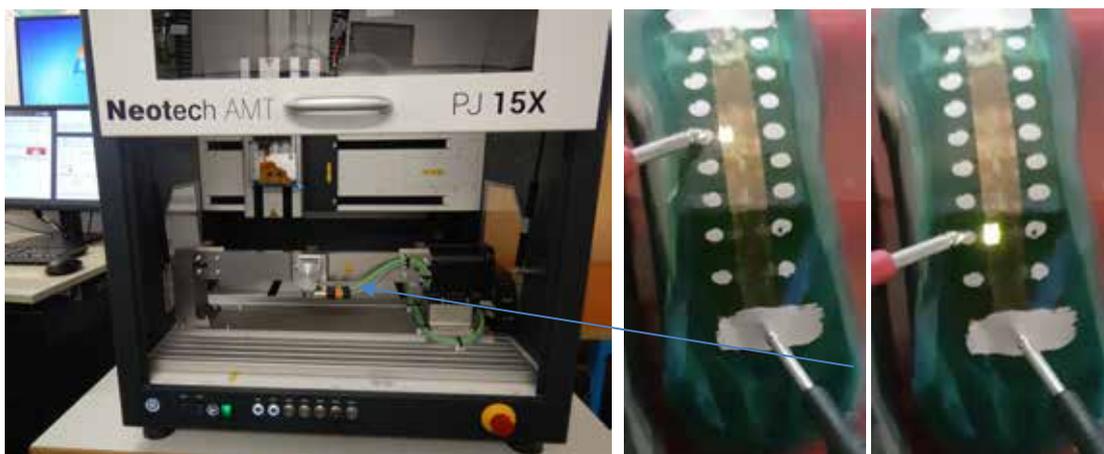


Abbildung 5: 5-Achs-Roboter der Fa. Neotech AMT mit Spectra S-Tintenstrahlkopf und 3D-Objekt „MIDster“ mit tintenstrahl-gedruckten, einzeln ansteuerbaren OLEDs der Architektur AgNP/N10/Super Yellow/HTL FHC/Ag NW (Details s. Text).

1.2.3 Rolle-zu-Rolle-Flexodruck von transparenten, leitfähigen Strukturen aus Silbernanodrähten

Im Rahmen des ZIM-Förderprojekts „Low Haze“ wurde in Kooperation mit der Firma RAS AG aus Regensburg eine neue Generation an Silbernanodrähten entwickelt, welche besonders dünn und lang sind. Aufgrund dieser Eigenschaften weisen entsprechende Beschichtungen mit diesem Material eine hohe Leitfähigkeit, eine hohe Transparenz und ein geringes Streuverhalten („Haze“) auf. Abbildung 6 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop(REM)-Aufnahme dieser Silberdrähte im Nanometer-Maßstab.

An der Solarfabrik der Zukunft wurden auf Basis dieser Nanodrähte verschiedene Tintenformulierungen entwickelt und für die Prozessierung mit unterschiedlichen Drucktechnologien optimiert. Ebenso wurden die dazugehörigen Druckprozesse entwickelt und damit Beschichtungen unterschiedlicher Größe sowohl im kleinen Labormaßstab als auch im großtechnischen Produktionsmaßstab realisiert. Die angestrebten Zielwerte der Schichtparameter (Leitfähigkeit < 30 Ohm/sq, Transparenz < 90 % und Haze < 5 %) wurden dabei in beiden Fällen erzielt. Außerdem konnten die Schichten erfolgreich als Elektrodenmaterial in organische Photovoltaikmodule integriert werden.



Abbildung 6: Links: REM-Aufnahme eines Netzwerks aus ultradünnen Silbernanodrähten. Rechts: Flexodruck von transparenten, leitfähigen Strukturen aus Silbernanodrähten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

Bei der Entwicklung unterschiedlicher Druckprozesse ist die Etablierung eines Rolle-zu-Rolle-Flexodruck-Verfahrens zum Aufbringen leitfähiger Strukturen aus Silbernanodrähten direkt auf PET-Folie besonders hervorzuheben (Abbildung 6, rechts). Durch die speziellen Eigenschaften der neu entwickelten Silbernanodrähte (wenig lichtstreuend) sind diese Strukturen nahezu unsichtbar für das menschliche Auge und können somit vielfältig im Bereich der gedruckten Elektronik angewendet werden, v.a. dort, wo Transparenz eine große Rolle spielt (z.B. RFID-Antennen auf Fenstern oder Folien).

1.3 Kooperationen

Die Entwicklung der Perowskit-Module erfolgte in Zusammenarbeit mit der Armor Solar Power Films GmbH (La Chevrolière/F & Kitzingen), dem Lehrstuhl iMEET der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Qualitätskontrolle im Rahmen des EET-Teilprojekts 2) und dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (Materialscreening mit Hochdurchsatzmethoden).

Die Entwicklung des Systems für die optoelektronische Funktionalisierung von 3D Objekten erfolgte im Rahmen des AiF-geförderten Projekts OLE3D in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der FAU sowie der Firma Neotech GmbH. Im projektbegleitenden Ausschuss sind die Firmen Neotech AMT, Inotech, Henkel, Automatic Research, 2E mechatronic, KH Foliotec, Seho sowie Hoffmann+ Krippner vertreten. Das Verfahren zur Abscheidung der Silbernanopartikel-Elektroden wurde gemeinsam mit dem Kooperationspartner DOWA Europe entwickelt.

Die Entwicklung des Flexodruck-Prozesses von transparenten Elektroden aus Silbernanodrähten auf flexible Substrate erfolgte gemeinsam mit der RAS GmbH (Regensburg) im Rahmen des ZIM-Projekts „Low Haze“.

1.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Die Personal- und Sachmittel wurden vollständig ausgeschöpft. Das verbleibende Investitionsbudget wurde v.a. für die Installation von in-line-QC-Geräten eingesetzt.

1.5 Ausblick

Im Rahmen der Kooperation mit Armor SPF sollen auf Grundlage der an Laborzellen erzielten Ergebnisse großflächige Perowskit-Module auf flexiblen Substraten entwickelt werden, die sich im Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf flexiblen Substraten fertigen lassen.

Im Rahmen von Nachfolgeprojekten des AiF-Projekts OLE3D ist geplant, hochqualitative Verkapselungen von optoelektronischen Bauteile auf 3D Körpern mittels Digitaldruckverfahren herzustellen und somit Langzeitstabilität zu erreichen. Zudem sollen Messverfahren entwickelt werden, um die Qualität der auf 3D-Körpern aufgedruckten Schichten in-line quantifizieren zu können.

2 Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse

2.1 Bildgebende Defektanalyse

Im Rahmen des EET Projekts werden völlig neue Beschichtungsverfahren entwickelt, mit denen Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld umgesetzt wird. Nachdem mit hochaufgelöster Photolumineszenz (PL) und Elektrolumineszenz (EL) eine erfolgreiche Qualitätskontrolle umgesetzt wurde, die auch bei der Entwicklung der Weltrekord-Module des ZAE Bayern zum Einsatz kam, konnten die zerstörungsfreien Analysemethoden im Berichtszeitraum zusätzlich durch eine hochsensitive Thermographie erweitert werden. Während großflächige Defekte wie eine fehlerhafter Schichtdicke oder Materialzusammensetzung in PL erkannt werden und Kontaktprobleme im EL-Bild sichtbar sind, können insbesondere Kurzschlüsse an kleinsten Defekten nicht immer detektiert werden. Unter Umständen kann es aufgrund eines hohen Stromflusses trotz der kleinsten Defektfläche zu starken Verlusten im Füllfaktors und damit der erzielten Leistung führen. Diese signifikanten Leistungseinbußen durch Punktdefekte stellen jedoch auch die Möglichkeit zur Detektion dar. Der lokale Wärmeeintrag am Defekt breitet sich lateral aus, wodurch auch Defekte unterhalb der Auflösungsgrenze aufgrund ihrer thermischen Signatur erkannt werden können. Mit Hilfe einer speziell entwickelten Messkammer, die durch ein Saphir-Glas Fenster die nötige Transmission im Infraroten gewährleistet, wurden organische Solarzellen unter verschiedensten Stress-Bedingungen untersucht. Dabei konnte insbesondere demonstriert werden, wie kleinste Defekte in der Thermographie detektiert werden können, indem das sogenannte Lock-In-Verfahren zur Auflösung zeitlicher Temperaturunterschiede im milli-Kelvin Bereich angewendet wurde (Abbildung 7). Durch Behandlung mit einem kurzen Strompuls in Rückwärtsrichtung kann ein leitfähiger Defekt überhitzt werden, wodurch er seine Leitfähigkeit verliert. Das homogene Thermographie-Bild zeigt die wiederhergestellte Bauteilfunktion.

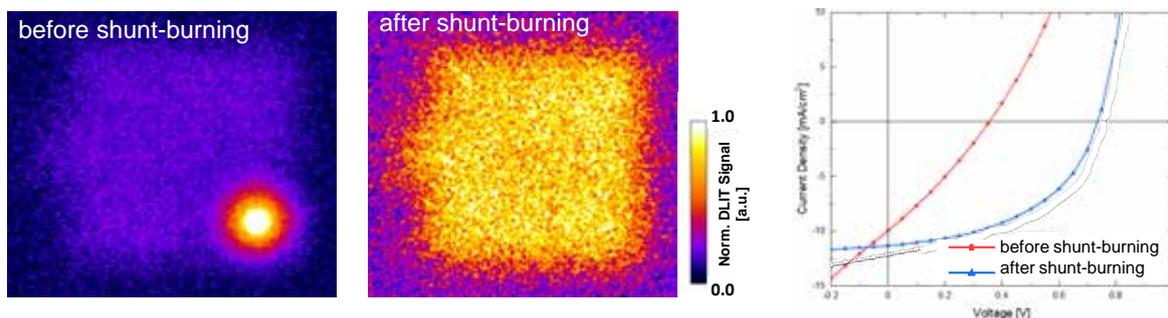


Abbildung 7: Hochsensitive Thermographie ermöglicht die Identifizierung kleinster Defekte. Durch Behandlung mit einem Strompuls können leitfähige Defekte überhitzt und damit inaktiviert werden. Die IV-Charakteristik der Solarzelle, insbesondere der Füllfaktor, wird dadurch wiederhergestellt.

Neben der Qualitätskontrolle während der Herstellung zeigten sich die bildgebenden Methoden im Projektverlauf insbesondere auch hilfreich für die Identifizierung von Degradationsmechanismen während der Beleuchtung. Nachdem in verschiedene Schichten der Solarzelle gezielt Defekte eingebracht worden waren und somit die jeweilige Signatur in EL und PL bekannt ist, konnten im Berichtszeitraum Degradationsmechanismen in beleuchteten Solarzellen identifiziert werden. Dabei wurden optische Langpass-Filter zur Reduktion des UV- und Blauanteils verwendet, um eine Wellenlängenabhängigkeit zu untersuchen. Im EL-Bild sind zunächst temporäre Defekte der Zinkoxid-Schicht sichtbar, die unter Beleuchtung durch Desorption von Sauerstoff aktiviert wird (Abbildung 8). Hierdurch sind nach 110h Degradation in allen Proben die Punktdefekte verschwunden. Nach 235 h ist für die Probe, die ohne Filter beleuchtet wurde, eine homogene Abnahme der EL-Intensität sichtbar, während in den anderen beiden Proben mit Langpass-Filter weniger Verluste auftreten. Dagegen sind im PL-Bild nur leichte Änderungen sichtbar, was darauf hindeutet, dass die aktive Schicht in weiten Teilen intakt ist, und eine Degradation am Interface zum ZnO stattgefunden hat. Durch den Einsatz von UV-Filtern kann in fertigen Bauteilen diese Degradation reduziert werden, alternativ können neue Interface-Materialien wie SnO_x oder Polyelektrolyte eingesetzt und mit EL/PL evaluiert werden.

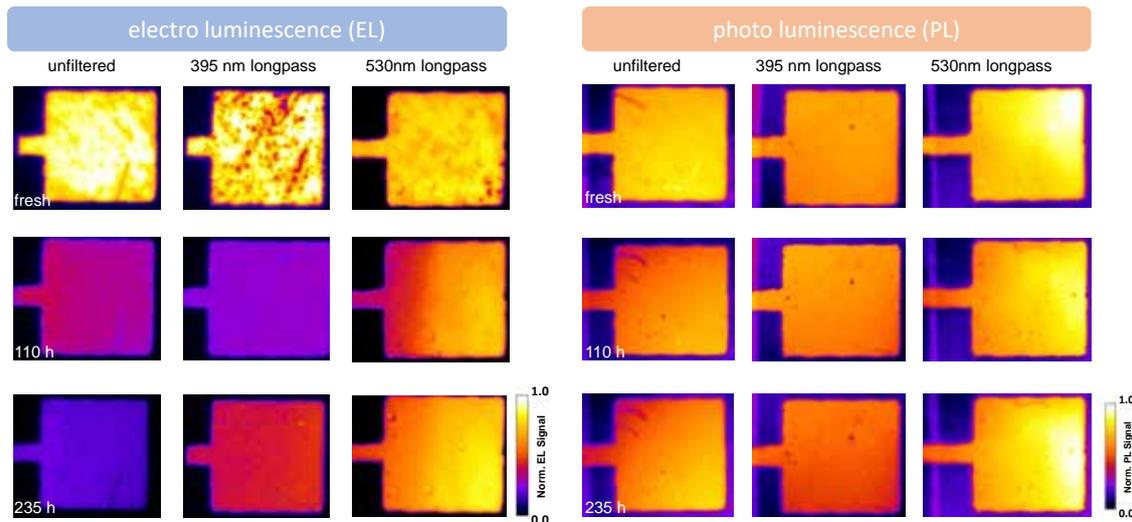


Abbildung 8: Degradation unter Beleuchtung mit verschiedenen Langpass-Filtern zeigt eine wellenlängenabhängige Degradation in den EL-Bildern. Die PL-Bilder zeigen für die gleichen Bedingungen nur leichte Veränderung, was auf eine Degradation am Interface der aktiven Schicht zur Elektrode hinweist.

2.2 Photolumineszenz und Absorption zur Vorhersage der Performanz

Während bildgebende Verfahren die Kontrolle von Schichthomogenität und Degradationseffekten erlauben, können insbesondere spektral aufgelöste zerstörungsfreie Methoden wertvolle Informationen zur Vorhersage von Bauteileigenschaften aus Materialdaten ermöglichen. In einer ausführlichen Studie wurde die Ladungsträgergeneration in hocheffizienten Materialien untersucht, die mit minimalem Energieoffset zwischen Donor und Akzeptor sehr hohe Leerlaufspannungen ermöglichen. Unter diesen Rahmenbedingungen ist die Ladungsträgergeneration nicht mehr primär durch die Morphologie bestimmt, sondern durch das Verhältnis der Exzitonenlebensdauer im Akzeptor Reinmaterial (Y6 bzw. o-IDTBR) im Vergleich zur Exzitonenlebensdauer in der Donor-Akzeptor Mischung (Abbildung 9a). Hierbei wurde eine Serie aus WF3-basierten Polymeren untersucht. Die hohe Exzitonenlebensdauer, erkennbar an dem langsamen PL-Zerfall für Y6, führt zur hohen Effizienz der aktuellen Rekordsolarzellen mit Y6 als Akzeptor. Im Vergleich dazu erlauben o-IDTBR Solarzellen nur mit manchen Donor-Materialien effiziente Ladungsträgergeneration. Durch die Messung der transienten PL an neuen Materialien, die aktuell in großer Zahl synthetisiert werden, kann schon vor dem Bau einer Solarzelle das Potential einer bestimmten Donor-Akzeptor Kombination zur Ladungsgeneration bestimmt werden.

Darüber hinaus ist es durch ein Einsatz von maschinellem Lernen gelungen, Bauteilkenngrößen und sogar Stabilität von Y6-basierten Solarzellen vorherzusagen (Abbildung 9b). Hierfür wurden über 100 Solarzellen mit verschiedensten Prozessparametern hergestellt und gealtert. Diese Daten wurden mit Features korreliert, die aus den Absorptionsdaten der aktiven Schicht extrahiert wurden. Hierdurch kann mit hoher Zuverlässigkeit die finale Effizienz eines Bauteils anhand von Absorptionsdaten der aktiven Schicht vorhergesagt werden.

Aktuell wird ein faserbasierter Messkopf zur spektralen Untersuchung von PL und Absorption aufgebaut, der an einem xy-Tisch getestet wird und anschließend an einem Roboterarm montiert werden soll. Damit können PL- und Absorptions-Daten für die oben vorgestellten Methoden, die aufgrund ihres Informationsgehalts reinen intensitätsbasierten Bildern zu bevorzugen sind, automatisiert aufgenommen werden. Durch Rastern des Messkopfs können schließlich auch orts aufgelöste Karten von planaren und später von 3D Objekten erstellt werden.

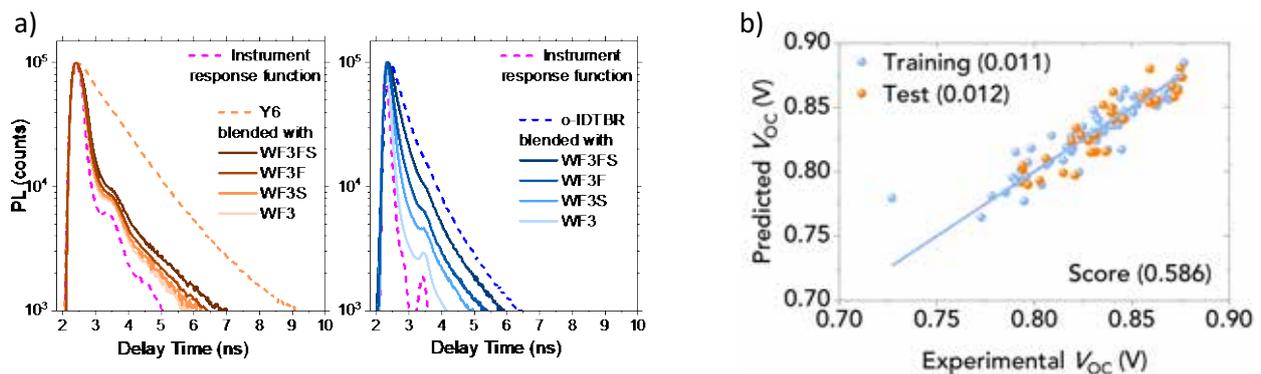


Abbildung 94: a) Zeit aufgelöste Photolumineszenz-Messungen können das Potential neuer Materialmischungen zur Erzeugung freier Ladungsträger evaluieren (Classen et al. Nature Energy 2020). b) Maschinelles Lernen, basierend auf der spektralen Analyse von Absorptionmessungen, erlaubt die Vorhersage von Bauteileffizienz und Lebensdauer (Du et al. Joule 2020)

2.3 Ausschöpfung der Fördermittel

Die Personalmittel wurden vollständig ausgeschöpft, ein Teil der Investitionsmittel soll im nächsten Jahr für die Erweiterung des faserbasierten spektralen PL- und Absorptionaufbaus mit Rasterfunktion verwendet werden.

3 Smarte und schaltbare Fenster

3.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Wolfgang Heiss

3.2 Arbeiten und Ergebnisse

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von elektrochromen Fenstern, deren Transmission im sichtbaren und infraroten Spektralbereich gezielt eingestellt werden kann. In diesem Projektjahr wurden verschiedene elektrochrome Nanopartikel-Tinten synthetisiert und entwickelt. Die Arbeiten umfassen dabei die Optimierung von Tinten aus Preußisch-Blau mittels Hochdurchsatzmethoden als auch die Adaptierung und Skalierung von Synthesen aus Metall-Oxiden. Es wurden verschiedene elektrochrome Bauteile realisiert und getestet und vielversprechende Ergebnisse erzielt.

3.2.1 Hochdurchsatz-Optimierung von Preußisch-Blau Nanopartikelintinten für elektrochrome Fenster.

Preußisch-Blau ist ein seit langem bekanntes blaues Pigment, das mit verschiedenen Methoden, entweder über Synthesen in wässriger Lösung oder über elektrochemische Abscheidung gewonnen wird. Wir haben das Ziel, aus Preußisch-Blau stabile Tinten herzustellen, die das großflächige Drucken von elektrochromen Fenstern erlauben sollen. Dazu haben wir eine neue Synthese von Nanopartikelösungen entwickelt, die hier mit einem automatisierten Robotersystem optimiert worden ist. Die Synthese wurde in Ethylenglykol, bekannt auch als frostsicheres Kühlmittel von Verbrennungsmotoren, über die Reaktion von zwei einfachen Reaktanden durchgeführt, in denen Eisen in unterschiedlichen Valenzzuständen vorliegt (Fe^{3+}/Fe^{2+}). Mit einem Pipetten-Roboter, der am HI-ERN (Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy) betrieben wird, wurden die Nanokristall-Tinten in mehreren Schritten optimiert. Die Nanopartikel-Dispersionen (Insert in Abbildung 10a) wurden vor allem in Bezug auf deren kolloidale Stabilität optimiert. Während zunächst alle verwendeten Verhältnisse zwischen den Reaktanden tiefblau gefärbte kolloidale Nanokristall-Dispersionen ergeben haben, konnte nach einer Lagerzeit von 8 Wochen ein klarer Unterschied

zwischen den Tinten festgestellt werden. Tinten mit einem $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ Verhältnis zwischen 0.555 und 2.22 sind langzeitstabil, während geringere Verhältnisse außerhalb dieses Bereiches eine Aggregation zeigen und deshalb als nicht geeignet eingestuft werden können.

Im zweiten Schritt wurde das Aufschleudern der Tinten mit einem weiteren automatisierten Aufbau des HI-ERN Institutes (eines Spinbots, Abbildung 10a) optimiert. Dazu wurden die Nanopartikel in eine wässrige Lösung eingebracht. Getestet wurden dabei unterschiedliche Parameter für das Spinbot-Gerät, unterschiedliche Nanopartikelkonzentrationen, verschiedene Additive (Benetzungsmittel und weitere Lösungsmittel) in den Dispersionen. Die Evaluierung der Schichthomogenität erfolgte über automatisierte Absorptionsmessungen an verschiedenen vorgegebenen Stellen am Substrat als auch über visuelle Inspektion von Fotos der Schichten, um eventuelle kleine Aggregate in den Filmen zu detektieren. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, dass der resultierende Film in einem einzelnen Arbeitsschritt hergestellt werden kann.

Um aus den Preußisch-Blau Schichten ein elektrochromes Bauelement oder Fenster her zu stellen, ist es nicht ausreichend, aus einem elektrochromen Film eine Arbeitselektrode herzustellen, sondern man benötigt dazu auch eine Gegenelektrode, in der Ionen gespeichert werden können, sowie einen Elektrolyten. Im Wesentlichen entspricht das elektrochrome Bauteil somit einer Dünnschicht-Batterie. Diese sollte aus Feststoffen bestehen, und sowohl die Gegenelektrode als auch der Elektrolyt sollten komplett transparent sein. Diese Komponenten wurden in den vorangegangenen Projektjahren bereits entwickelt und sind hier noch weiter adaptiert worden. Die elektrochromen Bauteile aus dem Preußisch-Blau (Abbildung 10) zeigen eine hohe Modulationsfähigkeit der optischen Transmission zwischen 70% und ca. 10% und einen Farbumschlag zwischen transparent und Blau. Fotos durch solche Bauteile sind im Insert in Abbildung 10b gezeigt. Was noch bleibt, ist die Gegenelektrode in Bezug auf ihre Niedertemperatur-Prozessierung zu optimieren und die Bauteile zu skalieren, immer mit einem Augenmerk auf deren Stabilität unter Sonneneinstrahlung und als Funktion der angelegten Schaltzyklen.

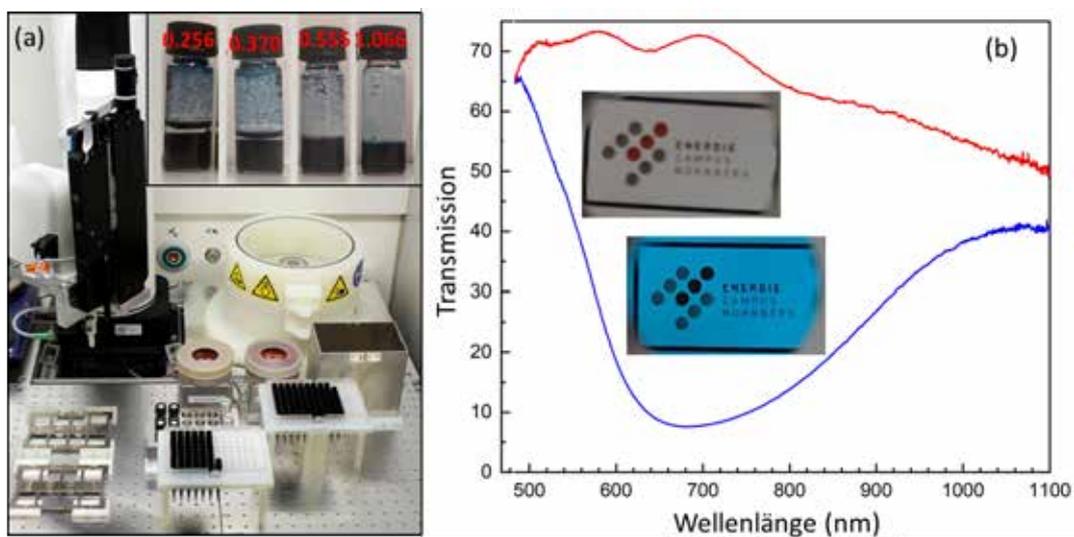


Abbildung 50: (a) Aufbau für das automatisierte Aufschleudern von funktionalen Tinten für die Roboter unterstützte Optimierung von dünnen Filmen. Inset: Nanokristalline Tinten aus Preußenblau nach einer Lagerzeit von 8 Wochen. Abhängig von der Zusammensetzung ergeben sich unterschiedliche Stabilitäten, die über die Präzipitation der Nanopartikel in der Dispersion beobachtet werden kann. (b) Transmission der elektrochromen Bauteile im transparenten und gedimmten Zustand. Inset: Fotos des ENCN Logos durch ein elektrochromes Bauteil unter verschiedenen Schaltstufen.

3.2.2 Elektrochrome Bauteile aus Metalloxid-Nanokristallen

Während unsere Untersuchungen von Metalloxid-Nanokristallen aus Indium-Zinn-Oxid für den infraroten Spektralbereich zu dem Schluss geführt haben, dass elektrochrome Bauelemente aus ökonomischen Gründen eher keine Chance auf eine industrielle Umsetzung haben, gibt es weitere Metall-Oxid Nanokristall Systeme, welche im Sichtbaren vielversprechende Eigenschaften aufweisen. Zwei dieser möglichen Systeme haben wir seit Mitte 2020 untersucht. Einerseits wurden

Wolframoxid WO_{3-x} Nanokristalle, welche in der Literatur beschrieben sind, erfolgreich reproduziert und die Synthese in den Gramm-Maßstab skaliert. Aus diesen Nanokristallen wurde eine Tinte formuliert, welche mittels Filmziehergerät aufgebracht werden kann und dabei ausreichend dicke Filme ergibt, die in einer elektrochemischen Halbzelle unter Anlegung eines Potentials eine tiefe Blaufärbung zeigen (Abbildung 11a). Der größte elektrochrome Effekt wird dabei im infraroten Spektralbereich zwischen 1000 und 1700 nm erzielt. Das zweite Material, das synthetisiert und skaliert wurde ist VO_x . VO_x ergibt eine passende Gegenelektrode zum WO_{3-x} und die Färbung kann zwischen gelb (11b) und transparent verändert werden. Kombiniert man nun Elektroden aus diesen beiden Metall-Oxid Nanokristall-Materialien in einem elektrochromen Bauteil, so ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Färbung des Bauteils zwischen Grün und Transparent zu verändern (Abbildung 11c). Wichtig für unsere Anwendung ist dabei auch, dass auch die Transmission des infraroten Spektralbereichs sehr effektiv moduliert wird, so dass man Schaltzustände wie kalt und warm zusätzlich zu transparent und gedimmt realisieren kann.

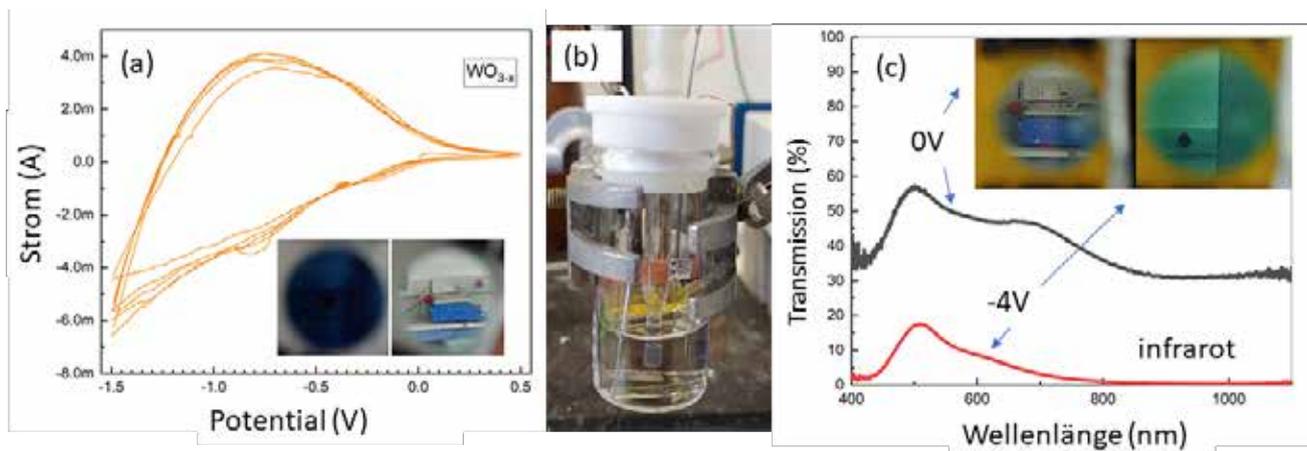


Abbildung 61: (a) Zyklische Voltammetrie Messkurven an einer WO_{3-x} Nanokristall-Elektrode, die bei negativen angelegten Potentialen stark blau gefärbt ist und bei Nullpotential transparent. Das Insert zeigt den Blick durch ein elektrochromes Bauteil mit WO_{3-x} Nanokristallelektroden im gefärbten und im transparenten Zustand. (b) In einer elektrochemischen Zelle wird eine Elektrode aus VO_x Nanokristallen (gelb gefärbt) getestet. (c) Wird eine Elektrode aus WO_{3-x} mit einer aus VO_x in einem elektrochromen Bauteil kombiniert, so kann die Transmission von transparent bei 0V in grün bei -4V verändert werden. Diese Bauteile blockieren bei angelegter Spannung auch den infraroten Spektralbereich bei Wellenlängen größer 800 nm.

3.3 Kooperationen

Die Arbeiten in Bezug auf die Preußisch-Blau Pigment-Tinten und deren Optimierung wurden in Zusammenarbeit mit dem HI-ERN (Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy), unter Verwendung derer Infrastruktur, durchgeführt.

3.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Um die vorhandenen Mittel des Projektes mit den Rücklagen aus dem letzten Jahr effektiv aus zu schöpfen, haben wir seit Mitte 2020 anstatt mit der einen geplanten Stelle mit zwei weiteren Mitarbeitern an dem Projekt gearbeitet. Dies hat zu einem schnelleren Vorrücken in Bezug auf die Projektziele beigetragen.

3.5 Ausblick

Die Arbeiten in Bezug auf die Metall-Oxid Nanokristalle in elektrochromen Bauteilen müssen noch weiter verbessert werden, sind aber bereits so vielversprechend, dass wir die Beantragung eines EXIST-Forschungstransferprojektes im Sommer 2021 planen. Mit den Ergebnissen des Preußisch-Blau sind einerseits eine wissenschaftliche Publikation und andererseits eine Skalierung der Bauteile auf die am ENCN vorhandene Druckanlage geplant.

4 Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld

4.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: ZAE Bayern

Leitung: Prof. Christoph Brabec, Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf (ZAE)

4.2 Arbeiten und Ergebnisse

Das Ziel dieses Teilprojekts ist die Demonstration der Aufskalierbarkeit der entwickelten Technologien, ihrer Integrierbarkeit in Gebäude sowie ihrer Leistungsfähigkeit und Lebensdauer unter Betriebsbedingungen. Dazu wurden in dieser Projektperiode die Rolle-zu-Rolle-Verfahren für die Produktion organischer Photovoltaik (OPV) soweit optimiert, dass die für Anwendungsprojekte benötigten Flächen zur Verfügung gestellt werden können. Mit den bereitgestellten organischen Solarmodulen wurde ein „Mockup“ der für das Jahr 2021 im INNO Park Kitzingen geplanten OPV-Fassade installiert, um Montage, Leistung und Lebensdauer der OPV-Module unter realistischen Bedingungen testen zu können (Abbildung 12).



Abbildung 72 "Mockup" der für das Boardinghouse des INNOPARK Kitzingen geplanten multifunktionalen Fassade mit den drei semitransparenten OPV-Glasvordächern der "Solarfabrik der Zukunft". Die Glasvordächer fungieren sowohl als Sonnenschutz als auch als Stromversorgung.

4.2.1 Fassadenintegration organischer PV-Module und Langzeitstudien zu deren Leistung und Lebensdauer

Voraussetzung für die Durchführung von Anwendungsprojekten in der Größenordnung der OPV-Fassade in Kitzingen ist die Möglichkeit, die benötigten OPV-Module in ausreichender Menge und in gleichbleibend hoher Qualität zu produzieren. Dafür wurden die Produktionskapazitäten der „Solarfabrik der Zukunft“ im Jahr 2020 erweitert, v.a. im sogenannten „Backend“-Bereich, also der Konfektionierung, Kontaktierung und Verkapselung der Module. Damit stehen nun semitransparente Module in drei verschiedenen Farben für die Gebäudeintegration zur Verfügung (Abbildung 13). Für die OPV-Glasvordächer des Mockups wurde das Materialsystem P3HT:oIDTBR gewählt, das sich mit hoher Reproduzierbarkeit verarbeiten lässt (Abbildung 13, rechts).

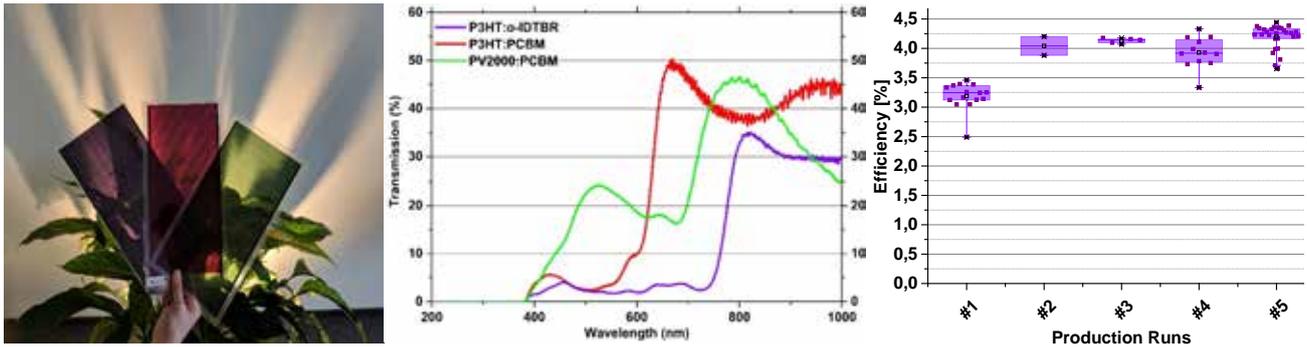


Abbildung 83 Semitransparente OPV-Module auf der Basis dreier verschiedener Materialsysteme (P3HT:PCBM, P3HT:oIDTBR und PV2000:PCBM, links), deren UV/Vis-Transmissionsspektren (Mitte), sowie der Effizienz der P3HT:oIDTBR-Module aus verschiedenen Fertigungsdurchgängen (rechts).

Um sicherzustellen, dass die OPV-Module die für die Fassadenintegration notwendige Lebensdauer besitzen, wurden sie zunächst beschleunigten Lebensdauertests unterzogen. Dies sind zum einen der nach der ISOS-D3-Richtlinie durchgeführte Test in feuchter Hitze (65°C bei 85% rel. Feuchte) und zum anderen der Test bei kontinuierlicher Bestrahlung (1000W/m² bei 65°C) nach ISOS-L2. Die Ergebnisse für den Test in feuchter Hitze sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Module zeigen über 1000 h hinweg keinerlei Degradation. Die Ergebnisse für kontinuierliche Bestrahlung sind in Abbildung 15 dargestellt. Die Module erreichen hierbei einen t80-Wert (Zeit bis die Effizienz auf 80% ihres Anfangswerts abgefallen ist) von 550 h. Die Module genügen damit den Anforderungen für die Gebäudeintegration, zumal durch die Lamination der Folien zwischen die Glasscheiben der Dachkonstruktion ein zusätzlicher Schutz besteht.

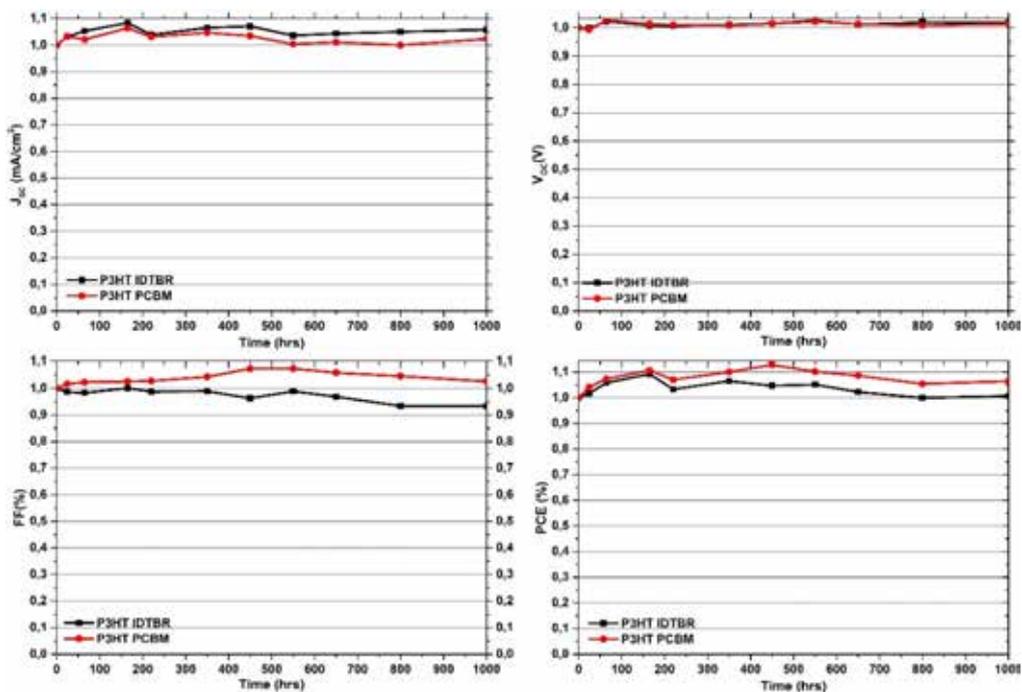


Abbildung 94 Lebensdauer der OPV-Module in feuchter Hitze (65°C/85%RF) gemäß ISOS-D3-Protokoll. J_{sc} – Kurzschlussstrom, V_{oc} – Leerlaufspannung, FF – Füllfaktor, PCE – Effizienz.

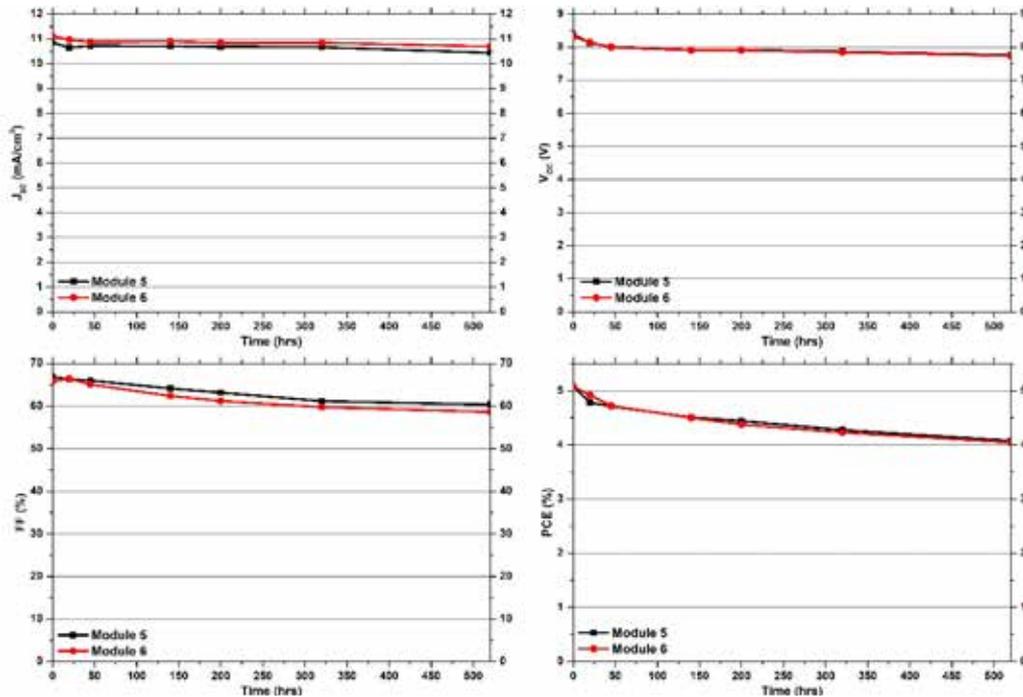


Abbildung 105 Lebensdauer der OPV-Module unter Dauerbestrahlung mit dem Äquivalent einer Sonne gemäß ISOS-L2-Protokoll. J_{sc} – Kurzschlussstrom, V_{oc} – Leerlaufspannung, FF – Füllfaktor, PCE – Effizienz.

Im Rahmen der baurechtlichen Zulassung des OPV-Glasvordachs werden von der Baubehörde ein Brandschutz- sowie ein Statik-Gutachten gefordert. Für die brandschutzrechtliche Zulassung wurde am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TUM ein Brandschachttest durchgeführt, der von den Modulen auch bestanden wurde. Für das Statik-Gutachten wurden Probekörper hergestellt und beim Labor für Stahl- und Leichtmetallbau GmbH eingereicht. Um die vorhabenbezogene Bauartgenehmigung zu erhalten, muss unter anderem die Resttragfähigkeit der Verglasungen im Bruchfall nachgewiesen werden. Das Glasdach wird deshalb in die vorgesehene Aufhängung eingehängt, beschädigt und mit einer definierten Last beschwert (Abbildung 16). Auch nach mehrmaliger Schädigung durch Körnerschläge verblieben die Scheiben unter Last für 72 Stunden fest in der Auflagerung, ohne dass sich Bruchstücke lösten. Somit erfüllen die Verglasungen die Anforderungen an die Resttragfähigkeit nach E DIN 18008-1:2018-05.

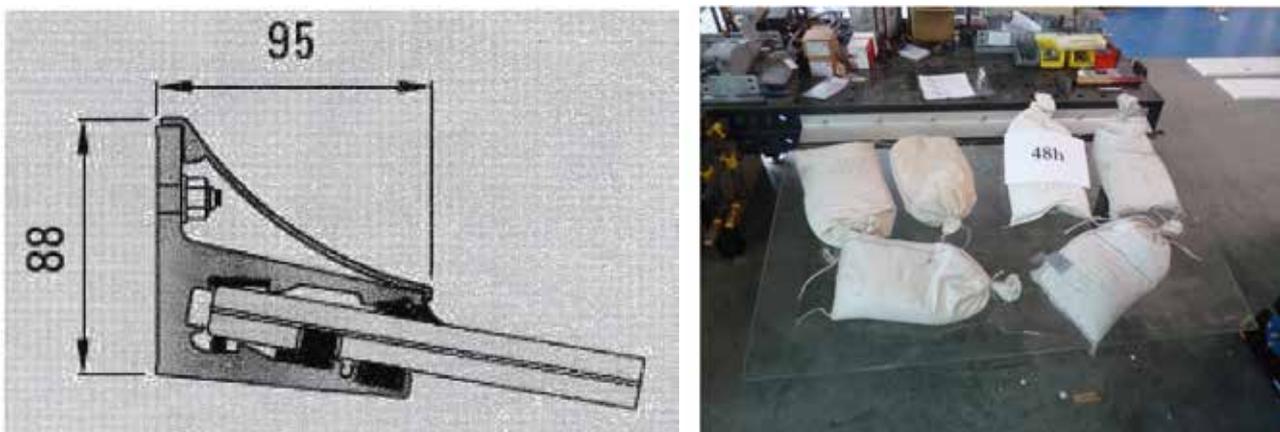


Abbildung 116 Ablauf der Statik-Prüfung des OPV-Glasvordachs. Links: Aufhängung des OPV-Glasdachs in der Halterung. Rechts: Simulierte Last nach Rissbildung.

Nach der Erbringung des Nachweises, dass die Module die Lebensdauer- und Sicherheitsanforderungen erfüllen, wurden sie hinsichtlich ihrer Leistungsdaten unter Labor- und Betriebsbedingungen charakterisiert. Zunächst wurden die Module unter standardisierten Laborbedingungen hinsichtlich der Abhängigkeit ihrer Leistung von Einstrahlwinkel, Lichtintensität und Temperatur mit Referenzmodulen aus m-Si verglichen. Für die Ermittlung der Winkelabhängigkeit der Modulleistung wurde die Orientierung der Module im Bereich von 0° bis 70° gegen die Richtung zur Lichtquelle variiert und die Module jeweils elektrisch vermessen (Abbildung 17). Die Winkelabhängigkeit der Leistung der beiden PV-Technologien unterscheidet sich nur unwesentlich, obwohl bei den OPV-Modulen auf eine Antireflexionsschicht verzichtet wurde. Dies liegt im Wesentlichen am geringeren Brechungsindex der verwendeten organischen Materialien im Vergleich zu Si.

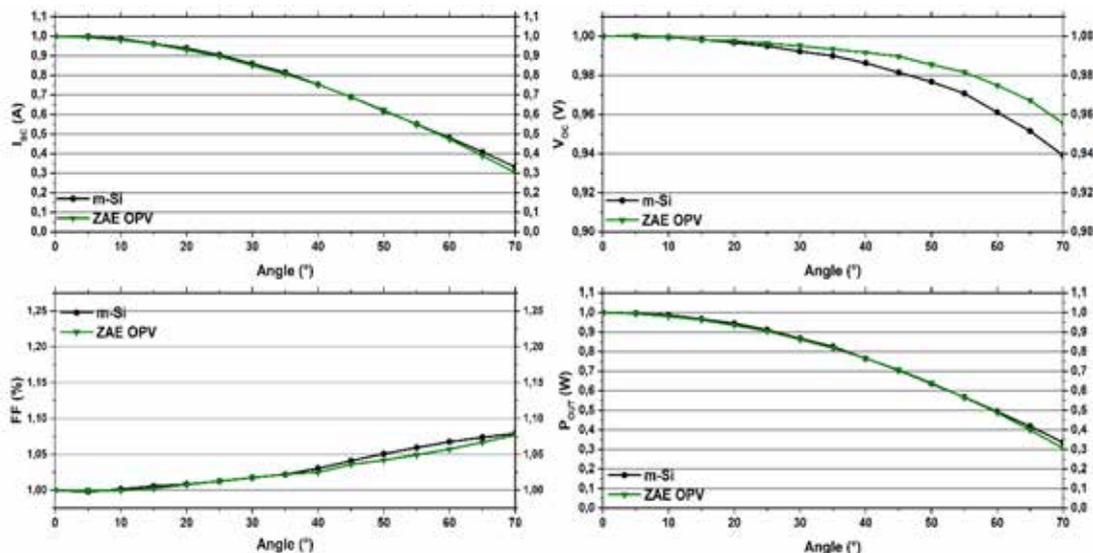


Abbildung 127 Einstrahlwinkelabhängige Charakterisierung der OPV-Module im Vergleich zu einem kommerziell erhältlichen m-Si-Referenz-PV-Modul. J_{sc} – Kurzschlussstrom, V_{oc} – Leerlaufspannung, FF – Füllfaktor, P_{out} – elektrische Ausgangsleistung.

In ähnlicher Weise wurde für die Charakterisierung des Schwachlichtverhaltens die Beleuchtungsintensität variiert und die Module hinsichtlich ihrer elektrischen Leistung vermessen (Abbildung 18). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die OPV-Module auch bzgl. ihrer Lichtintensitätsabhängigkeit ähnlich wie m-Si verhalten.

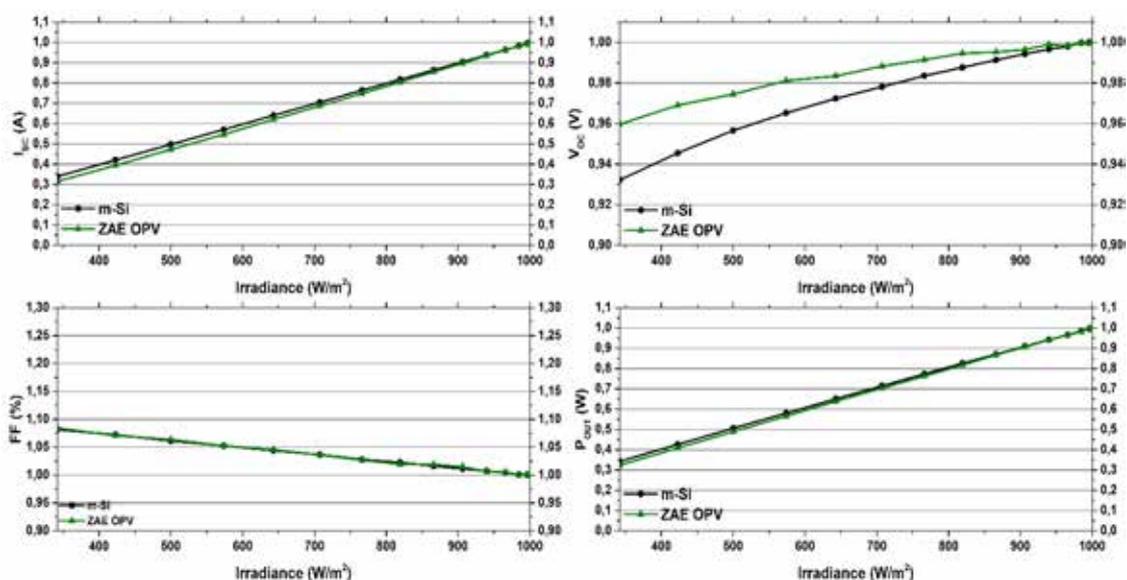


Abbildung 138 Lichtintensitätsabhängige Charakterisierung der OPV-Module mittels Tunnelflasher im Vergleich zu einem kommerziell erhältlichen m-Si-Modul. J_{sc} – Kurzschlussstrom, V_{oc} – Leerlaufspannung, FF – Füllfaktor, P_{out} – elektrische Ausgangsleistung.

Die Module wurden anschließend im Außeneinsatz unter Betriebsbedingungen auf ihren Energieertrag hin evaluiert. Die Module wurden dazu mit demselben Messkonzept vermessen, das eingesetzt werden wird, um den Energieertrag der Module in der Fassade des Boardinghauses zu erfassen. Die Module wurden für einen optimalen Neigungswinkel (45°) und für senkrechte Ausrichtung (90°), wie für Gebäudeintegration in Fassaden typisch, untersucht. Die spezifischen Erträge der OPV- und m-Si-Module sind in Abbildung 19 im Tagesverlauf dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die OPV-Module hinsichtlich ihres spezifischen Ertrags (Wh/W_p) im Verlauf eines Tages den m-Si-Modulen überlegen sind. Der Grund hierfür liegt in einer niedrigeren Modultemperatur und dem in Vergleich zu Si-Modulen deutlich geringeren Temperaturkoeffizienten im Falle der OPV-Module.

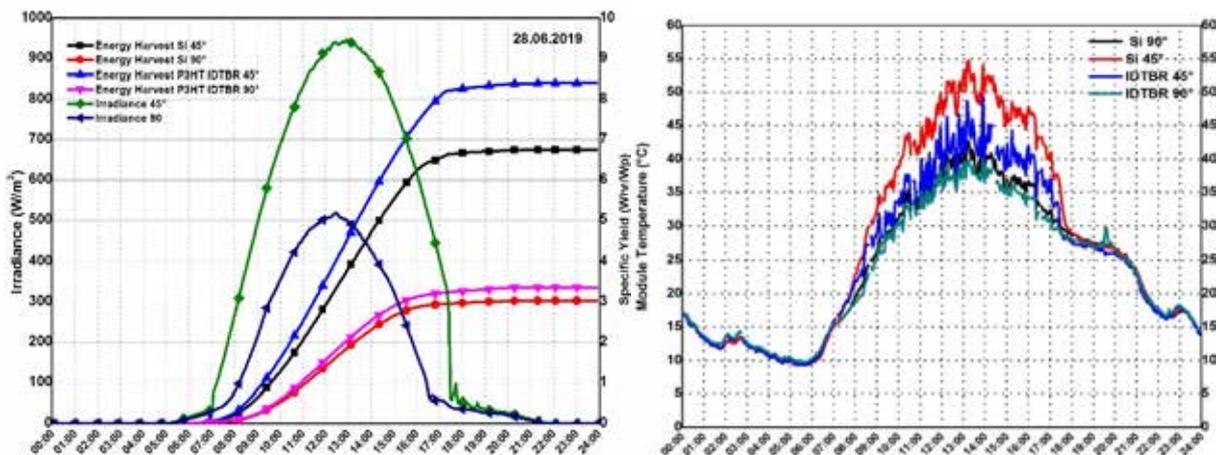


Abbildung 19: Tagesverlauf der Einstrahlung und des spezifischen Ertrags, d.h., der erzeugten elektrischen Energie pro installierter Leistung (Wh/W_p) (links) und der Temperatur (rechts) der OPV-Module (blau, magenta) im Vergleich zu Referenzmodulen (m-Si, schwarz, rot) im Freien an einem klaren Sommertag bei 45° (blau, schwarz) und 90° (magenta, rot) Orientierung zur Horizontalen.

Schließlich wurde über einen Zeitraum von 33 Wochen eine Langzeit-Überwachung der Module im Außeneinsatz durchgeführt, die in Abbildung 20 dargestellt ist. Auch in dieser Darstellung werden die aufgrund ihrer geringeren Temperaturkoeffizienten höheren spezifischen Erträgen der OPV-Module deutlich, wobei dieser Effekt für die 45°-Ausrichtung der Module und während der Sommersaison aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung und den dadurch höheren Modultemperaturen stärker ausgeprägt ist. Während des Untersuchungszeitraums ist keine Degradation der OPV-Module erkennbar, was die beschleunigten Lebensdauermessungen im Labor bestätigt.

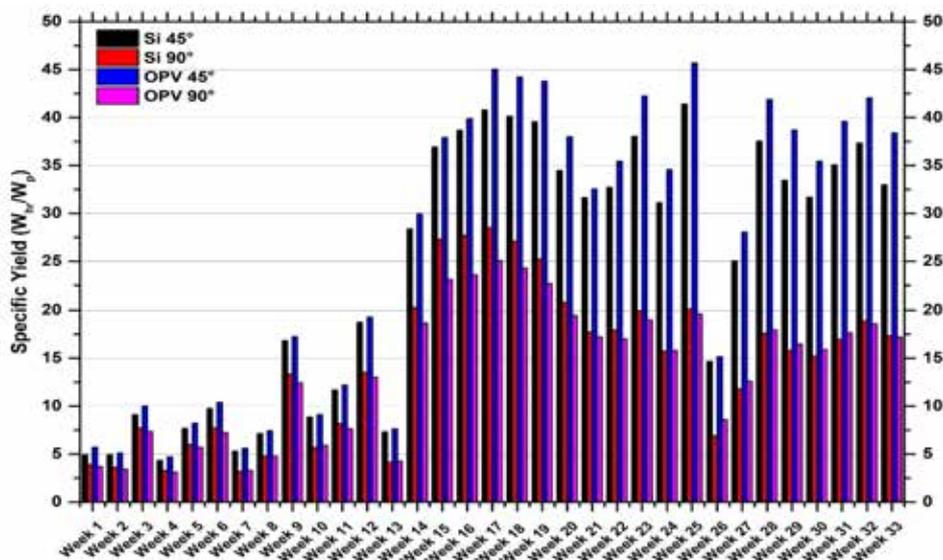


Abbildung 140: Langzeit-Monitoring des spezifischen Ertrags der OPV- und m-Si-Referenzmodule bei 45° (blau, schwarz) und 90° (magenta, rot) Orientierung zur Horizontalen. Die Module wurden mit demselben Messkonzept vermessen, das für die Ermittlung des Energieertrags der Boarding House-Fassade vorgesehen ist.

4.3 Kooperationen

Das Projekt wird in Kooperation mit den am EnCN vertretenen Gruppen der Technischen Hochschule Nürnberg (Prof. Dentel und Kießling) sowie dem Hohenstein Institut für Textiltechnik, in enger Abstimmung mit dem vom BMWi geförderten Projekt Fassade³, durchgeführt. Als Industriepartner sind die Armor SPF GmbH, die INNOPARK Kitzingen GmbH und die ACX GmbH beteiligt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse haben den EET-Projektpartner FAU dabei unterstützt, die EU-Projekte Booster und Citysolar einzuwerben.

4.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Personal- und Sachmittel wurden ausgeschöpft. Investitionsmittel wurden nahezu vollständig verausgabt.

4.5 Ausblick

Die am Fassaden-Mockup gewonnenen Erkenntnisse bestätigen die Eignung der an der „Solarfabrik der Zukunft“ entwickelten OPV-Module für eine nachhaltige und ästhetisch ansprechende Fassadenintegration. Im verbleibenden Projektzeitraum wird die Fassade am Boarding House des INNOPARK Kitzingen installiert und energetisch charakterisiert. Daraus werden sich v.a. in Hinblick auf die Bestandssanierung wichtige neue Erkenntnisse über den energetischen Effekt modularer multifunktionaler OPV-Fassadenelemente sowie weiteren Entwicklungsbedarf bei OPV-Solarmodulen ergeben.

5 Schlussworte

Die Teilprojekte des Projekts EET haben ihre für 2020 vorgesehenen Ziele erreicht. Im Teilprojekt 1 wurden in enger Kooperation mit Industrieunternehmen Technologien entwickelt, die es ermöglichen, hocheffiziente, stabile und semitransparente organische sowie Perowskit-basierte PV-Module unter industriellen Bedingungen auf nahezu beliebige Unterlagen zu drucken. In Teilprojekt 2 wurden bildgebende Messverfahren entwickelt, um diese Produktionsprozesse in-line zu kontrollieren. In Teilprojekt 3 wurden die Voraussetzungen geschaffen, um durch Beschichtung von Glas mit Nanopartikel-Suspensionen schaltbare Fenster herzustellen. In Teilprojekt 4 wurde durch den Aufbau eines Fassaden-„Mockups“ die Integrierbarkeit gedruckter OPV-Module in Gebäudefassaden bestätigt.

Im Jahr 2021 werden die Arbeiten mit der Demonstration der Skalierbarkeit und Integrierbarkeit der entwickelten Technologien für PV-Module und schaltbare Fenster abgeschlossen. Dazu werden die Herstellungsverfahren hinsichtlich Durchsatz und Qualität weiter optimiert, insbesondere durch die Integration von in-line Qualitätskontrolle in den Produktionsprozess. Die OPV-Glasvordächer werden in die Fassade des Demonstrationsgebäudes im INNOPARK Kitzingen eingebaut und mit Hilfe der entwickelten Monitoring-Systeme gemeinsam mit dem Projektpartner THN energetisch evaluiert.

6 Vorträge & Poster 2020

- [1] H.-J. Egelhaaf. How to Make Efficient OPV Modules. Invited talk at the IIT-Center for Nano Science and Technology, Milan/Italy, 2020.
- [2] A. Distler. New World Record Efficiency for Organic Photovoltaic Modules. EU PVSEC 2020.
- [3] S. Feroze. Printed Semi-transparent and Multi-colored PV Modules for BIPV Applications. 15th Conference on Advanced Building Skins, Berne/CH, 2020.
- [4] A. Distler. New World Record Efficiency for Organic Photovoltaic Modules. 5th Next Generation Solar Energy, Erlangen/Guangzhou/Online, 2020.
- [5] A. Distler. Solar Factory of the Future - R2R Production of OPV Modules. 5th Next Generation Solar Energy Conference, Erlangen/Guangzhou/Online, 2020.
- [6] F. Yang. Fully Printable Highly Efficient Carbon based Planar Perovskite Solar Modules. 5th Next Generation Solar Energy Conference, Erlangen/Guangzhou/Online, 2020.

7 Veröffentlichungen 2020

- [1] A. Distler, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, "Organic Photovoltaic Modules with New World Record Efficiencies", *Progr. Photovoltaics* **29** (2021) 24 – 31.
- [2] C.J. Brabec, A. Distler, X. Du, H.-J. Egelhaaf, J. Hauch, T. Heumueller, N. Li, "Material Strategies to Accelerate OPV Technology Toward a GW Technology", *Adv. En. Mater.* **10** (2020) 2001864.
- [3] F. Yang, L.R. Dong, D.J. Jang, K.C. Tam, K.C. Zhang, N. Li, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, "Fully Solution Processed Pure α -Phase Formamidinium Lead Iodide Perovskite Solar Cells for Scalable Production in Ambient Condition", *Adv. En. Mater.* **10** (2020) 2001869.
- [4] E. Gu, X. Tang, S. Langner, P. Duchstein, Y. Zhao, I. Levchuk, V. Kalancha, T. Stubhan, J. Hauch, H.-J. Egelhaaf, D. Zahn, A. Osvet, C.J. Brabec, "Robot-Based High-Throughput Screening of Antisolvents for Lead Halide Perovskites", *Joule* **4** (2020) 1806-1822
- [5] Z. Wang, L. Zeng, C. Zhang, Y. Lu, S. Qiu, C. Wang, C. Liu, L. Pan, S. Wu, J. Hu, G. Liang, P. Fan, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, F. Guo, Y. Mai, "Rational Interface Design and Morphology Control for Blade-Coating Efficient Flexible Perovskite Solar Cells with a Record Fill Factor of 81%", *Adv. Funct. Mater.* **30** (2020) 2001240
- [6] O.J.J. Ronsin, D. Jang, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, J. Harting, "A phase-field model for the evaporation of thin film mixtures", *PCCP* **22** (2020) 6638-6652
- [7] P. Maisch, K.C. Tam, D. Jang, M. Steinberger, F. Yang, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf. „Inkjet printed organic and perovskite photovoltaics—review and perspectives“. In *Organic Flexible Electronics* (pp. 305-333). Woodhead Publishing, 2020.
- [8] I. A. Channa, A. Distler, C.J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, "Solution-coated barriers for organic electronics". In *Organic Flexible Electronics* (pp. 249-303). Woodhead Publishing, 2020.
- [9] S. Langner, F. Häse, J. D. Perea, T. Stubhan, J. Hauch, L. M. Roch, T. Heumueller, A. Aspuru-Guzik, C. J. Brabec, "Beyond Ternary OPV: High-Throughput Experimentation and Self-Driving Laboratories Optimize Multicomponent Systems", *Adv. Mater.* **32** (2020) 1907801
- [10] X. Du, L. Lüer, T. Heumueller, J. Wagner, C. Berger, T. Osterrieder, J. Wortmann, S. Langner, U. Vongsaysy, M. Bertrand, N. Li, T. Stubhan, J. Hauch, C. J. Brabec, "Elucidating the Full Potential of OPV Materials Utilizing a High-Throughput Robot-Based Platform and Machine Learning", *Joule*, doi:10.1016/j.joule.2020.12.013
- [11] X. Du, T. Heumueller, W. Gruber, O. Almora, A. Classen, J. Qu, F. He, T. Unruh, N. Li, C. J. Brabec, Unraveling the Microstructure-Related Device Stability for Polymer Solar Cells Based on Nonfullerene Small-Molecular Acceptors, *Adv. Mater.* **32** (2020) 1908305
- [12] Zhao, Y., Miao, P., Elia, J. *et al.* "Strain-activated light-induced halide segregation in mixed-halide perovskite solids", *Nat. Commun.* **11** (2020) 6328
- [13] A. Classen, C. L. Chochos, L. Lüer, V. G. Gregoriou, J. Wortmann, A. Osvet, K. Forberich, I. McCulloch, T. Heumueller, C. J. Brabec, "The role of exciton lifetime for charge generation in organic solar cells at negligible energy-level offsets", *Nature Energy* **5** (2020) 711–719
- [14] O. Mashkov; J. Körfer; A. Eigen; A. A. Yousefi-Amin; N. Killilea; A. Barabash; M. Sytnyk; N. Khansur; M. Halik; K. G. Webber; W. Heiss. Effect of Ligand Treatment on the Tuning of Infrared Plasmonic Indium Tin Oxide Nanocrystal Electrochromic Devices. *Advanced Engineering Materials*, **22**(9), 1–7, (2020)
- [15] J. J. Prías Barragán; K. Gross; J. Darío Perea; N. Killilea; W. Heiss; C. J. Brabec; H. Ariza Calderón; P. Prieto. Graphene Oxide Thin Films: Synthesis and Optical Characterization. *ChemistrySelect*, **5**(38), 11737–11744 (2020)

- [16] M. Sytnyk; A. A. Yousefi-Amin; T. Freund; A. Prihoda; K. Götz; T. Unruh; C. Harreiss; J. Will; E. Spiecker; J. Levchuk; A. Osvet; C. J. Brabec; U. Künecke; P. Wellmann; V. V. Volobuev; J. Korczak; A. Szczerbakow; T. Story; C. Simbrunner; G. Springholz; D. Wechsler; O. Lytken; S. Lotter; F. Kampmann; J. Maultzsch; K. Singh; O. Voznyy; W. Heiss, Epitaxial Metal Halide Perovskites by Inkjet-Printing on Various Substrates. *Adv. Funct. Mater.*, **30**(43), 1–10. (2020)
-

8 Patente 2020

- [1] H.-J. Egelhaaf, M. Wagner, P. Kubis, Method for manufacturing a semiconductor module and semiconductor module thus obtained, angemeldet am 27.07.2020
- [2] H.-J. Egelhaaf, K. Forberich, L. Lucera, C. J. Brabec, Verfahren zur Herstellung eines Schichtbauteils und zugehörige Vorrichtung, DE 10 2016 211 170.1, erteilt am 20.01.2020

W2 Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU Institute – Materials for Electronics and Energy Technology (i-MEET)	TPJ1: Prof. Dr. Wolfgang Heiss

Projektbericht 2020

Die Stützprofessur beschäftigt sich mit lösungsprozessierten Halbleitern für potentielle Anwendungen in der Elektronik oder der Energietechnologie. In diesem Jahr wurden im Rahmen von 2 Projekten gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft vor allem Metall-Halid-Perowskite entwickelt. Einerseits wird hier versucht Halbleitermaterialien zu finden, die neben photovoltaischen auch ferroelektrische Effekte zeigen, um die Energieausbeute von Solarzellen zu verbessern. Andererseits arbeiten wir an einem neuen Detektortypen für bildgebende Röntgenmessungen, die aufgrund einer zusätzlichen Energieauflösung verbesserte Kontraste zwischen unterschiedlichen Materialien in den Bildern liefern sollen.

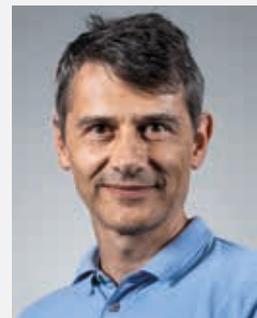


Einblick in die Forschung

KONTAKT

Prof. Dr. Wolfgang Heiß

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
wolfgang.heiss@fau.de

Telefon
+49 911 56854-9216

Web
www.encn.de

1 Ferroelektrische Metall-Halid-Perowskite

Im Rahmen eines Projektes das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft über ein internationales Graduiertenkolleg (GRK) gefördert wird, arbeitet ein Mitarbeiter der Gruppe an der Entwicklung neuer Metall-Halid Perowskit Halbleiter für die Energiegewinnung. Das spezielle an diesen Materialien soll sein, dass sie neben den üblichen halbleitenden Eigenschaften auch ferroelektrische Eigenschaften aufweisen sollen, so dass man nicht nur aus Sonnenlicht, sondern auch aus mechanischer Bewegung Energie gewinnen kann. Ein Ziel dabei ist auch, konventionelle Dünnschicht-Solarzellen so zu modifizieren, dass sie aufgrund des eingebauten ferroelektrischen Feldes eine höhere Spannung liefern, oder gar einen höheren Wirkungsgrad. Idealerweise werden solche ferroelektrischen Metall-Halid Perowskite für diese Anwendungen als Einkristall hergestellt. Dies macht ein Material-Screening allerdings sehr schwierig, zumal das Wachstum von Einkristallen aus der Lösung mitunter extrem langsam ist und pro Kristall mit ansprechender Größe mehrere Monate dauern würde. Beschleunigte Verfahren zum Einkristallwachstum aus der Lösung, wie sie für manche bleihaltige Perowskite gezeigt worden sind, wurden von uns zwar getestet, haben aber nicht zu den erwünschten Materialien geführt. Deshalb haben wir in einem ersten Schritt Perowskite, die ferroelektrische als auch halbleitende Eigenschaften aufweisen könnten in Form von Nanokristallen synthetisiert. Diese lassen sich schnell herstellen und zeigen ob chemische Reaktionen grundsätzlich ablaufen und daraus auch die gewünschten Zusammensetzungen entstehen. Solche Nanokristalle zeigen mitunter Lumineszenz im sichtbaren Spektralbereich, mit unterschiedlichen Farben, die sich über deren Zusammensetzung und Dimensionalität einstellen lassen (Abbildung 1). Der Nachweis der ferroelektrischen Eigenschaften kann allerdings in Nanokristallen nur indirekt erbracht werden, wie z. B. über die Messung der Kristallstruktur, der Beobachtung einer Summenfrequenzbildung unter optischer Anregung, oder auch über die Ausbildung von Hysterese-Effekten in den Strom-Spannungskennlinien, die an Nanokristall-Filmen auch beobachtet wurden (Abbildung 2(b)). Um diese ferroelektrischen Indikatoren zu überprüfen wurden auch aus etablierten ferroelektrischen Materialien Nanokristalle synthetisiert um deren Verhalten in Strom-Spannungsmessungen zu überprüfen. Aber auch diese Materialien zeigen in Nanokristalliner Form keine eindeutigen Hinweise auf die Existenz von Ferroelektrizität in den Proben, so dass wir in den folgenden Projektjahren nun doch vermehrt Einkristalle aus der Lösung züchten werden, für die der Nachweis von Ferroelektrischen Eigenschaften ein Standardverfahren ist.

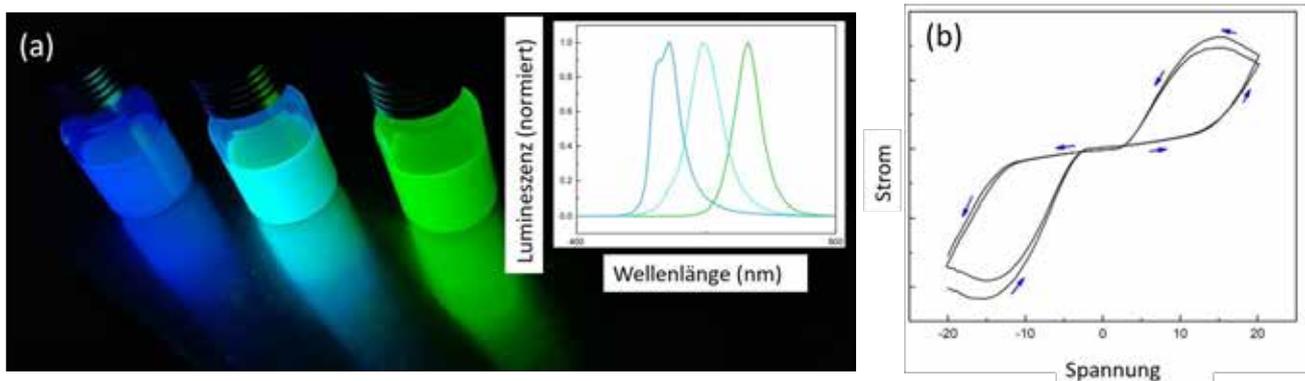


Abbildung 1: Kolloidale Lösungen mit Nanokristallen aus Perowskit Halbleitern die auch ferroelektrische Eigenschaften aufweisen. (a) Lumineszenz der Lösungen unter Anregung mit ultraviolettem Licht. Die Spektren der Lösungen sind im Insert gezeigt. (b) Die Strom-Spannungskennlinie einer Nanokristallschicht zeigt eine deutliche Hysterese, als Indiz für eventuelle ferroelektrische Eigenschaften.

2 Mehrfarben-Szintillatoren für die energieauflösende Röntgendetektion

Die aktuelle weltweite Pandemie-Situation hat gezeigt, wie wichtig die Röntgendiagnostik ist. Die Fähigkeit, die Entwicklung der Lungenheilung nach einer COVID 19-Infektion effektiv zu verfolgen, ist ein 100%iger lebensrettender Faktor für die Menschen bei der aktuellen Hospitalisierung von schweren Fällen. In einem Forschungsprojekt gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft hat sich deshalb ein Mitarbeiter der Arbeitsgruppe mit einer Weiterentwicklung von Röntgendetektoren befasst. Das Ziel ist dabei, dem Röntgenbild auch eine „Farbinformation“ zu geben, was in weiterer Folge das Erkennen und diskriminieren von einzelnen Details in den Röntgenbildern erleichtern soll. Ziel ist die Entwicklung einer effektiven Multi-Energie auflösenden Röntgenbildgebungstechnologie. Dazu haben wir in einer Vorarbeit die Entwicklung eines Stapels neuartiger lumineszierender Materialien vorgeschlagen, die auf chemischen Elementen aus verschiedenen Gruppen des Periodensystems der Elemente basieren. Diese unterschiedlichen Elemente werden von Röntgenstrahlung mit unterschiedlichen Energien unterschiedlich stark absorbiert. Um die Multi-Energie auflösende Röntgen-Detektion zu erreichen müssen die Materialien aus den unterschiedlichen Elementen nicht nur Röntgenstrahlung absorbieren, sondern auch noch bei unterschiedlichen Wellenlängen emittieren. Aus der Intensität der emittierten Strahlung als auch aus deren Farbe kann dann auf die Energie der Röntgenstrahlung rück geschlossen werden. In diesem Jahr haben wir intensiv an der Umsetzung dieses Vorschlages gearbeitet und dazu mehrere Materialien als Komponenten des neuartigen Röntgen-Detektions-Konzeptes getestet. Dabei haben wir auch einen besonderen Wert auf die Stabilität der Szintillator Materialien gelegt, um daraus langlebige Detektoren bauen zu können.

Wir haben gefunden, dass das Pigment Ägypten-Blau, das in antiken Figuren nachweislich benutzt worden und noch immer erhalten ist, sich als Röntgenszintillator eignet, welcher im nahen Infraroten leuchtet (Abbildung 2a) Es ist ein Silikat und besteht aus leichten Elementen wie Cu, Si, Ca, O, was sich für niederenergetische Röntgenstrahlung gut eignet. Als zweite Schicht mit schwereren Elementen und kürzerer Emissionswellenlänge schlagen wir die Verwendung von Zinn-basierten Perowskit-Quantenpunkten vor, die in einer Rubidium Bromid Matrix eingekapselt sind. Die Matrix ist hier notwendig, um eine ausreichende Stabilität der Perowskit-Nanokristalle zu gewährleisten. Wir entwickelten eine neuartige und einfache Methode zur Synthese dieser Metall-Halogenid-Perowskit-Quantenpunkten, die in eine kristalline Matrix eingebettet werden. Neben dem Sn-basierten Szintillator ist es uns gelungen, grün und blau emittierende Materialien auf Basis von Cs und Pb zu synthetisieren, die schwere Elemente darstellen und deshalb hochenergetische Röntgenstrahlung hervorragend absorbieren. Durch die Verwendung eines einfachen Aufbaus in einer Röntgenbeugungsmaschine (Abbildung 2b) haben wir eine echte Röntgen-Szintillation für die von uns präparierten Materialien demonstriert.

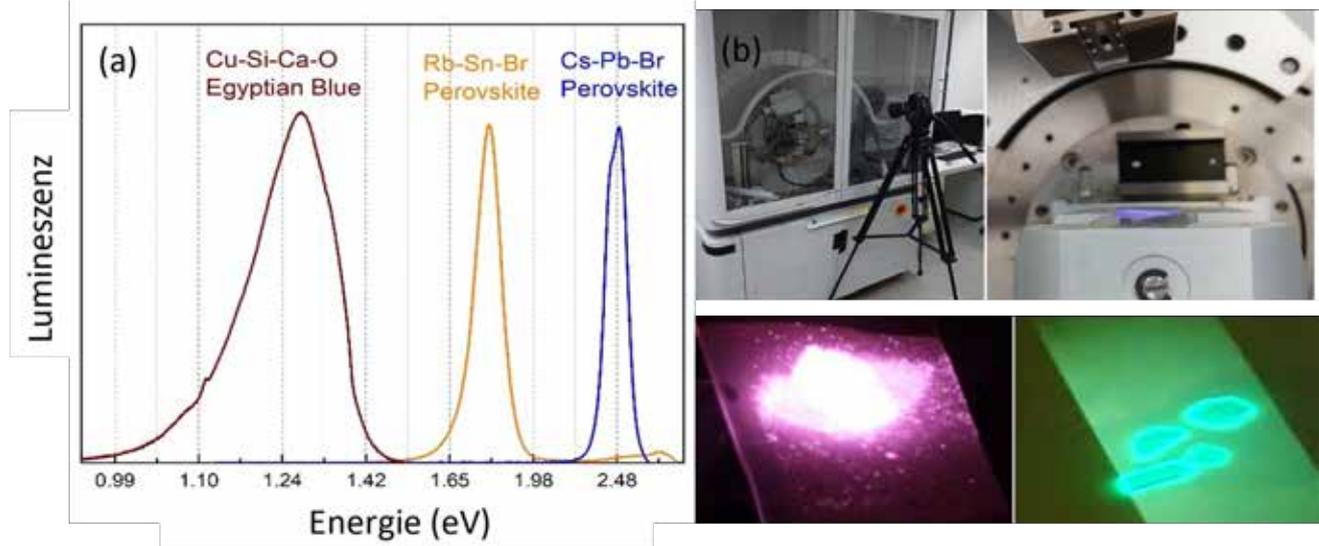


Abbildung 2: Mehrfarben-Szintillatoren für die energieauflösende Röntgendetektion. (a) Lumineszenzspektren verschiedener Szintillatormaterialien die in unterschiedlichen Farben leuchten. (b) Aufbau der Detektion der Szintillatorstrahlung an einem Röntgenbeugungsgerät mit Hilfe eines Fotoapparates. Die farbige Strahlung unter Röntgenanregung der Szintillator-Pulvermaterialien ist in den Fotos gezeigt.

3 Schlussworte

Metall-Halid-Perowskite haben in der Photovoltaik zu einer revolutionären Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen geführt. In unserer Arbeitsgruppe werden Materialien aus dieser Klasse für alternative Anwendungen entwickelt. Eine dieser Anwendungen ist die Röntgendetektion, für die wir erste Schritte unternommen haben, um den üblichen Szintillator-Detektoren eine höhere Informationstiefe zu geben. Diese sollte über die Einführung von energieauflösender Szintillation gelingen. Es wurden auch Schritte unternommen, um diese Materialien besonders stabil zu machen. Dazu werden die Perowskite in eine Matrix eingebettet. Erste Röntgendetektionsversuche mit diesen Materialien sind bereits gelungen. Des Weiteren bemühen wir uns die Möglichkeiten zu erweitern mit den Perowskit Halbleitern Energie zu gewinnen. Neben photovoltaischen Effekten sollen auch ferroelektrische Effekte ausgenutzt werden, so dass es letztendlich Strom nicht nur aus Sonnenlicht, sondern auch aus mechanischer Bewegung gibt. Hier sind erste Bemühungen erfolgreich gewesen, Materialien in nanokristalliner Form her zu stellen und weitere Bemühungen werden notwendig sein, um hier auch Einkristalle mit den gewünschten Eigenschaften herstellen zu können.

4 Veröffentlichungen 2020

- [1] J. J. Prías Barragán; K. Gross; J. Darío Perea; N. Killilea; W. Heiss; C. J. Brabec; H. Ariza Calderón; P. Prieto. Graphene Oxide Thin Films: Synthesis and Optical Characterization. *ChemistrySelect*, 5(38), 11737–11744 (2020)
- [2] M. Sytnyk; A. A. Yousefi-Amin; T. Freund; A. Prihoda; K. Götz; T. Unruh; C. Harreiss; J. Will; E. Spiecker; J. Levchuk; A. Osvet; C. J. Brabec; U. Künecke; P. Wellmann; V. V. Volobuev; J. Korczak; A. Szczerbakow; T. Story; C. Simbrunner; G. Springholz; D. Wechsler; O. Lytken; S. Lotter; F. Kampmann; J. Maultzsch; K. Singh; O. Voznyy; W. Heiss, Epitaxial Metal Halide Perovskites by Inkjet-Printing on Various Substrates. *Advanced Functional Materials*, 30(43), 1–10. (2020)

FORSCHUNGSBEREICH

Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 67540

Web
www.encn.de/netze

Elektrische Netze

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU LS für Elektrische Energiesysteme – Prof. Dr. Matthias Luther	TPJ1: ENGiNe (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther) TPJ2: Kopernikus ENSURE I (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther & Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger) TPJ3: Kopernikus ENSURE II (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther & Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger) TPJ3: InnoSys 2030 (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther & Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger)

Projektbericht 2020

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) beschäftigt sich am EnCN im Forschungsbereich Netze mit der Auslegung zukünftiger Übertragungs- und Verteilnetzstrukturen mit leistungselektronischen Komponenten sowie in der Integration von erneuerbaren Energiesystemen und -speichern unter dem Aspekt der Versorgungs- und Netzsicherheit.

Durch die Kopplung von digitaler Netzberechnung und der experimentellen Simulation von Energiesystemen im Labormaßstab 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.

Neben der generellen dynamischen Systemmodellierung mit dem Fokus auf Kontinentaleuropa verfügt der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme über einschlägige Erfahrung auf dem Gebiet der Modellierung von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ) und Flexible AC Transmission Systems (FACTS). Laufende Forschungsarbeiten zur Planung und dem Betrieb intelligenter Übertragungssysteme beschäftigen sich mit der generischen Modellierung von Betriebsmitteln und Komponenten, der Simulation hybrider Netzstrukturen (AC/DC), der Co-Simulation und der Schutztechnik.

KONTAKT

Prof. Dr. Matthias Luther

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 85 67540

1 ENGiNe – das Mikronetz- und Energiespeicherlabor am EnCN

Die zunehmende Integration regenerativer Energiesysteme führt zu einer Transformation des auf konventionellen Großkraftwerken basierenden Stromnetzes. Eine Schlüsseltechnologie stellt hierbei die Integration und gezielte Regelung von Stromspeichern dar. Mikronetze, wie auch Smart-Grid-Systeme sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung, da deren Grundgedanke auf eine intelligente Steuerung aktiver Betriebsmittel und eine fortschreitende Digitalisierung der Energienetze setzt. Neue Marktpotentiale aufgrund zunehmender technischer Möglichkeiten in diesem Bereich gehen einher mit der Notwendigkeit gezielter Forschung an realen Netzstrukturen und umfangreichen Tests neuer Systemkomponenten und Netzleittechnik.

Das Mikronetz- und Energiespeicherlabor *ENGiNe*

In den Laborräumen des EnCN betreibt der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme daher das Mikronetz- und Energiespeicherlabor *ENGiNe*. *ENGiNe* vereint die integrative Kopplung von Photovoltaik, Speichersystemen und der Echtzeitsimulation. Es dient der experimentellen und simulativen Untersuchung nachhaltiger digitaler Energieversorgungssysteme der Zukunft. Im Vordergrund stehen hierbei der Betrieb von Mikronetzen und das Testen neuartiger und innovativer Betriebsmittel in einer realen Systemumgebung. Durch den flexiblen Aufbau des Labors ergibt sich ein breites Feld an Untersuchungsmöglichkeiten in den Bereichen Energiespeicher, Mikronetze und Digitalisierungsanwendungen. Der Laboraufbau ermöglicht die Untersuchung des Zusammenspiels unterschiedlicher Betriebsmittel wie Speicher und regenerativer Energiesysteme. Als regenerative Einspeisung des Reallabors steht eine 17-kWp-Photovoltaikanlage auf den Dachflächen des EnCN zur Verfügung. Den Kern des Mikronetzes bilden mehrere Speichersysteme auf Blei-, Redox-Flow- und Lithiumbasis mit Speicherkapazitäten im Bereich von jeweils mehreren Kilowattstunden. Zukünftig soll das Labor um eine Umrichteranlage erweitert werden, mit deren Integration im Berichtsjahr begonnen wurde. Diese beinhaltet einen selbstgeführten AC-DC-Wandler (VSC) mit einem Zweipunkt-Stromrichter(2VSC) sowie einem Modularen Multilevel-Umrichter (MMC) und weiter einen DC-DC-Wandler mit einem Buck-Boost-Converter (BBC) sowie einer Dual-Active Bridge (DAB). Für den Betrieb wird diese an verschiedene Lithium-Speicherkomponenten angeschlossen sowie an das aufgebaute Netz des Labors.

Des Weiteren können real vorhandene Betriebsmittel durch simulative Komponenten über eine Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation ergänzt werden. Diese bietet die Möglichkeit, dem realen Mikronetz virtuelle Anlagenkomponenten (beispielsweise weitere Speichersysteme oder regenerative Energieanlagen) hinzuzufügen oder als Netzsimulator zu fungieren, um auch Betriebssituationen zu testen, die im realen Netz nur unvorhersehbar eintreten. Auf diese Weise können neuartige Betriebsmittel auf deren normgerechte Funktion getestet werden oder das Zusammenspiel ganzer Anlageneinheiten in einem Mikronetz. Als Schnittstelle zwischen der Echtzeitsimulation und dem realen Labornetz dient ein hochdynamischer, bidirektionaler Leistungsumrichter mit einer Nennleistung von 45 kVA im Vierquadrantenbetrieb. Über HiL-Simulationen lassen sich Entwicklungsrisiken reduzieren, da bereits in einem frühen Stadium realitätsgetreue Tests durchgeführt werden können. Auch Funktionstests von Netzsteuerungssystemen an simulierten und damit flexiblen Netzstrukturen werden durch den Einsatz der Echtzeitsimulation im Labor ermöglicht.



Abbildung 1: Echtzeitsimulator für Power-Hardware-in-the-Loop Anwendungen

Um einen ökonomisch und ökologisch optimalen Betrieb von Mikronetzen zu erreichen, werden in der Praxis meist mehrere Ebenen zentraler und dezentrale Regler eingesetzt. Im Mikronetz- und Energiespeicherlabor werden, basierend auf einem SIEMENS SICAM Microgrid-Controller, Betriebsstrategien entwickelt und im realen Laborumfeld getestet. Die Recheneinheit des Microgrid-Controllers schafft eine kommunikative Verbindung zu allen Anlagen und regelt diese zentral. Eine visuelle Oberfläche, sowie eine Messwertdatenbank kann dabei auf einem herkömmlichen Windows-PC ausgeführt werden.



Abbildung 2: Das Mikronetz ENGiNe am EnCN wird über einen zentralen Microgrid-Controller geregelt

Erfolgreicher Abschluss eines dreijährigen Forschungsprojekts mit der Siemens AG

Im April wurde ein dreijähriges Forschungsprojekt zwischen der Siemens AG und dem Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme abgeschlossen. Die Forschungsarbeiten hierfür wurden im Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe durchgeführt. Kernaspekt der Forschungstätigkeiten war unter anderem die Untersuchung von Heimspeichersystemen unter realen Betriebsbedingungen. Hierfür wurden drei Kleinspeichersysteme unterschiedlicher Batterietechnologie in einem Modell abgebildet und das Betriebsverhalten auf Anwendungsmöglichkeiten für hybride Speichersysteme übertragen. Im Fokus standen dabei auch technische, wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen für Kleinspeichersysteme.

Forschungsergebnisse Hybridspeicherbetrieb

Die begrenzte Lebensdauer von Batteriespeichersystemen stellt nach wie vor eine der größten Hürden für wirtschaftliche Anwendungen im stationären Bereich dar. Die Arbeitsgruppe im Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe verfolgt daher die Frage, wie durch eine Kombination unterschiedlicher Speichertechnologien die Alterung der Einzelsysteme reduziert werden kann. Als Ergebnis konnte in einem Modellansatz gezeigt werden, dass eine degradationsbedingte Reduktion der Kapazität (SOH) eines Lithium-Ionen Batteriespeichersystems durch eine Kombination mit einem Redox-Flow Speicher, bei geeigneter Betriebsstrategie, erheblich verbessert werden konnte [7].

Ausblick

Für das kommende Projektjahr sind weitere Forschungstätigkeiten im Bereich hybrider Speichersysteme und Mikronetzen geplant. Hierfür werden im Mikronetz- und Energiespeicherlabor realen Anlagenkomponenten durch simulative Betriebsmittel im Hardware-in-the-Loop Betrieb ergänzt.

2 Real Time Simulation (RTS) Labor

Für das 2019 in Betrieb genommene Echtzeitlabor des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme stand 2020 die Nutzung in Förderprojekten und die Akquise von Drittmittelprojekten im Fokus. Das Labor ist auch ein wesentlicher Bestandteil geplanter und laufender Untersuchungen im Projekt Kopernikus ENSURE II (siehe Abschnitt 4). Für 2021 ist dann der Einsatz in mehreren Projekten geplant.

Allgemeine Einsatzbereiche des Labors sind Tests für die Entwicklung von Schutzsystemen, die Prüfung von Energiespeichersystemen sowie Forschung im Bereich der Netzintegration von HGÜ- und FACTS.

Die Echtzeitsimulation stellt die Simulation eines physikalischen Systems dar, wobei die Simulationsdauer zeitlich vollkommen analog zum tatsächlichen physikalischen Zeitverlauf ist. Das Abweichen von Antwortzeiten ist dabei unzulässig (harte Echtzeit).

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung sind aufgrund der Größe und Komplexität der zu untersuchenden Systeme und Betriebsmittel reine hardwarebasierende Untersuchungen oftmals nicht möglich. Zusätzlich ist aus Gründen der Versorgungssicherheit ein direkter Eingriff in das in Betrieb befindliche Energieversorgungssystem nicht möglich. Echtzeitsimulatoren („Real Time Simulators“, RTS) bieten hier die Möglichkeit, in einer simulierten Umgebung reale Betriebsmittel, Inselnetze, Regelungssysteme, usw. wissenschaftlich fundiert zu untersuchen.

Der RTS dient insofern als innovatives Werkzeug, um auf dem Gebiet der elektrischen Energieversorgung eine hochqualifizierte, praxisnahe und nachhaltige Forschung betreiben zu können. Die drei nachfolgenden genannten Tätigkeitsfelder bieten für den Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme der FAU und den Bereich Netze am EnCN den Schwerpunkt der geplanten Forschung mit dem RTS:

- Systemregelung: „Control Systems Testing“
- Schutztechnik: „Protection Systems Testing“
- Systembetrieb: „Power Hardware in the Loop“

Hierzu sollen Untersuchungen in allen Spannungsebenen durchgeführt werden und so das komplette Spektrum der elektrischen Energieversorgung abgedeckt werden.

Kernkomponente des Labors bildet der Digitale Echtzeitsimulator (RTDS), der auf der Multicore-Verarbeitungsplattform NovaCor basiert und die Simulation komplexerer Netze in Echtzeit ermöglicht. Der installierte Simulator verfügt über beeindruckende E/A-Funktionen für den Anschluss realer Geräte. Mit mehr als 500 Kanälen für analoge und digitale Ein- und Ausgänge kann das Forschungsteam umfangreiche externe Schutz-, Steuer- oder Leistungsgeräte an das simulierte Netz anschließen. Leistungsverstärker von Omicron, TriphaseNV sowie Spitzenberger & Spies, die ebenfalls zum Labor gehören, ermöglichen den Anschluss von Geräten der Primär- und Sekundärtechnik für Hardware in the Loop oder Power Hardware in the Loop Untersuchungen bis hin zu 50 kVA. Umfangreiche Protokolle (z.B. IEC 61850), sowie ein leistungsstarker Satz von 12 GTFPGA-Einheiten runden den Simulator ab. Diese GTFPGA-Einheiten können besonders rechenintensive Komponenten oder Teilnetze simulieren.

Das Echtzeitlabor wurde durch die Bewilligung eines DFG-Großgeräteantrags über 2 Mio. € ermöglicht.

3 Kopernikus ENSURE I

Das Kopernikus-Projekt ENSURE (gefördert durch BMBF) 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.

Als Beitrag des LEES in ENSURE werden hybride und multivariate Stromnetze untersucht. Dabei soll die Interoperabilität und Systemstabilität von multivariaten und hybriden AC/DC Systemen und deren Betriebsmittel (z.B. HGÜ, STATCOM) bewertet und verbessert werden. Des Weiteren erfolgen Untersuchungen mit dem Ziel der Beherrschung multivariater Netzsituationen und Betriebsmittel hinsichtlich der Schutztechnik. Dies geschieht unter der Anforderung einer hohen Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schutzsysteme.

Zusammen mit der TenneT TSO GmbH wird das optimale Zusammenspiel leistungselektronischer Stellglieder sowie deren gegenseitige Beeinflussung und Interaktionen mit dem Übertragungsnetz und anderen Netznutzern untersucht. Dazu sollen Modelle der verschiedenen Bauteile und Komponenten in einer Simulationsumgebung verbunden werden, um somit eine präzise Abbildung eines realen Systems zu erreichen. Dadurch werden Ursachen gegenseitiger Beeinflussung verstanden und Lösungsansätze entwickelt.

Die erste Projektphase von Kopernikus ENSURE wurde Ende 2019 erfolgreich abgeschlossen.

4 Kopernikus ENSURE II

Februar 2020 startete die zweite Phase von Kopernikus ENSURE (gefördert durch BMBF). Die Ergebnisse der stark grundlagenorientierten Forschung aus Phase I sollen in Phase II zusammen mit den Industriepartnern weiter vorangebracht werden. ENSURE II wird in den kommenden Jahren den Aufbau des sogenannten Energiekosmos ENSURE in acht Gemeinden Schleswig-Holsteins vorbereiten. Hierbei handelt es sich um die Umsetzung von Lösungen der Energiewende in einer Modellregion.

Als Beitrag hierzu entwickelt der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme der FAU mit verschiedenen Partnern eine hard- und softwarebasierte Evaluationsumgebung. Das übergeordnete Ziel der Evaluationsplattform ist die Verknüpfung der in Kopernikus ENSURE erarbeiteten Hard- und Softwarelösungen zu einem technischen Gesamtkonzept und deren Analyse. Die Testplattform ermöglicht es verschiedenen Partnern in gemeinsamen Co-Simulationen ihre Anwendungsfälle im Gesamtsystem zu untersuchen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Interoperabilität der Technologien und die Vorbereitung von Demonstrator- und Feldtests. Notwendiges Werkzeug zum Aufbau der Evaluationsumgebung sind In-the-loop Co-Simulationen, die es den Partnern erlauben ihre Simulationen an einer gemeinsamen Plattform zu betreiben. Die Basis für die Untersuchungen sind gemeinsame Netzmodelle, welche ebenfalls unter Beteiligung des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme entwickelt werden. Über eine verteilte Echtzeitsimulation soll es ermöglicht werden Reallabore in die Evaluationsumgebung einzubinden, beispielsweise um Regelalgorithmen zu erproben und anhand der realen Systemantwort weiterzuentwickeln. Abbildung 3 zeigt den geplanten Aufbau der Evaluationsplattform und die Plattform betreibenden Partner. Aktuell sind hierbei OFFIS e.V., das KIT¹ und die FAU zu nennen. Darüber hinaus unterstützt die RWTH² beim Aufbau der geographisch verteilten Echtzeitsimulation. Auf der Plattform können dann ausgewählte Hard- und Softwarelösungen verschiedenster Partnern für den späteren Energiekosmos getestet werden. Mit den RTDS-Simulatoren bei KIT und FAU stehen zwei der leistungsstärksten Simulatoren im akademischen Bereich in Europa für die Plattform zur Verfügung. Die Simulatoren werden unter Nutzung der Software VILLASnode miteinander

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)

² Rheinisch Westfälische Hochschule Aachen, Institute for Automation of Complex Power Systems (ACS)

zum schnellen Datenaustausch zwischen einzelnen Netzknoten gekoppelt. Die Echtzeitsimulatoren erlauben die Anbindung von Feldgeräten zur Datenerfassung und Steuerung, und damit die Einbindung technischer Anlagen in den Reallaboren, sowie z.B. von Schutzgeräten bei der FAU für gemeinsame Simulationen. Über VILLASnode ließen sich bei Bedarf auch weitere Simulatoren von verschiedenen Partnern anbinden.

Neben dem Einsatz innovativer Werkzeuge wie der Co-Simulation und Echtzeitsimulation ist die dynamische Netzreduktion ein weiterer Themenschwerpunkt. Insbesondere das dynamische Verhalten zukünftiger Netze, mit der Integration eines hohen Anteils leistungselektronisch gekoppelter regenerativer Erzeugung, muss bei der Netzreduktion mit neuen wissenschaftlichen Methoden umgesetzt werden. Die Netzreduktion ist notwendig, um offline Netzmodelle für die Echtzeitumgebungen anzupassen.

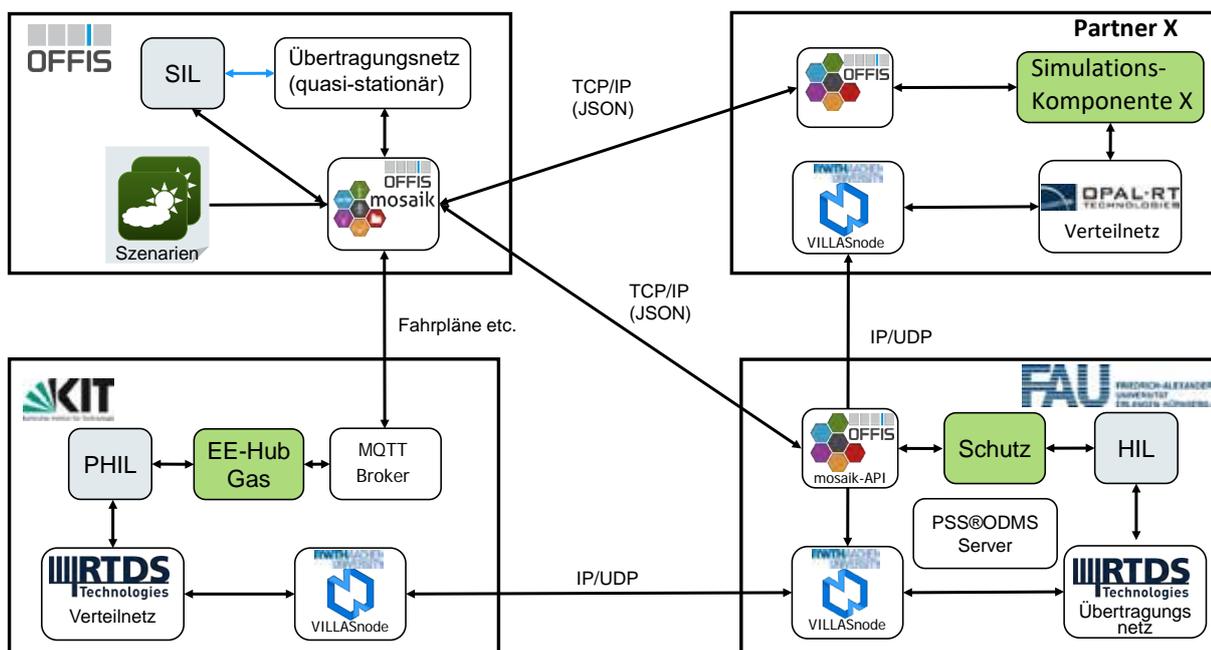


Abbildung 3: Testumgebung für Software- und Hardware-in-the-Loop Co-Simulationen

Ein weiteres Teilgebiet des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme der FAU umfasst die Konzeptionierung und Pilotierung eines hoch flexiblen Assistenzsystems zur automatisierten und adaptiven Schutzauslegung. Aufgrund der ambitionierten Ziele der Deutschen Bundesregierung den CO₂ Ausstoß drastisch zu reduzieren, Kohle- und Nuklearkraftwerke abzuschalten, sowie die Anzahl an Erneuerbaren Energien stetig zu steigern, unterliegen die elektrischen Übertragungsnetze starken strukturellen Veränderungen. Dies hat zur Folge, dass auch die Einspeise- und Fehlersituationen sich deutlich verändern und immer komplexer zu beherrschen sein werden. Konkrete von Menschen geplante Fahrpläne sind in diesen Systemen nicht mehr einzuhalten, weswegen nun auch die Sekundärtechnik - speziell die Schutztechnik - flexibel und schnell adaptiert werden können muss, um Systemausfälle zu verhindern. In der heutigen Praxis werden Netzschutzkonzepte von Experten auf Basis langjähriger Erfahrungswerte und unter fragmentarischer Zuhilfenahme von digitalen Werkzeugen erstellt. Dieser Arbeitsprozess besteht aus der Auswahl der Schutzfunktionen und der Schutzalgorithmen sowie der Berechnung der Schutzparameter in enger Koordination mit der vorliegenden Netzstruktur. Trotz der zukünftig zunehmenden Komplexität haben sich die Methoden der Schutzkonzepterstellung bisher kaum fortentwickelt. Das in diesem Projekt zusammen mit der Siemens AG und der Technischen Universität Ilmenau entwickelte Assistenzsystem (Pro-Toc = Protection Toolchain) besteht aus verschiedenen Bausteinen und Werkzeugen, die flexibel miteinander kombiniert werden können. So entsteht eine automatisierte Werkzeugkette, die abhängig der aktuellen Netzstruktur, Netzzustandes, Wetters, angeschlossenen Erzeugungsanlagen und weiterer Kriterien das optimale Schutzkonzept vorab errechnet. Eine Übersicht des Aufbaues der Pro-Toc ist in Abbildung 4 dargestellt. Zunächst lädt das System alle notwendigen Daten, die für die anschließenden Berechnungen und

Entscheidungen von Expertensystemen notwendig sind. Derzeit können verschiedenen Datenformate von etablierten Simulationsprogrammen gelesen und geschrieben werden. Perspektivisch ist jedoch eine sukzessive Anbindung an die Schnittstelle des digitalen Zwillings, welche im Teilprojekt 4 des Kopernikus/Ensure Projektes erarbeitet wird, vorgesehen. Die direkte Vernetzung mit dem digitalen Abbild des Netzes wird es ermöglichen, stets auf die aktuellste Datenlage zurückzugreifen, um schnellstmöglich und optimal auf Veränderungen reagieren zu können. Nach Laden der Daten in ein generisches Datenmodell, welches an der FAU entwickelt wird, folgen verschiedene Vorberechnungen und Auswertungen, die den nachfolgenden Bausteinen zur Verfügung gestellt werden. Anschließend durchläuft die Pro-Toc die Blöcke Konzepterstellung, Algorithmenauswahl, Schutzeinstellungen und Gesamtsystembewertung. Bei der Entwicklung der letzten drei Blöcke ist die FAU ebenfalls mitbeteiligt. Nach Fertigstellung kann das sichere Schutzkonzept samt aller berechneten Werte exportiert oder zurück in den digitalen Zwilling geladen werden. Im Anschluss werden die Parameter dann auf die im Feld befindlichen adaptiven Schutzgeräte übertragen.

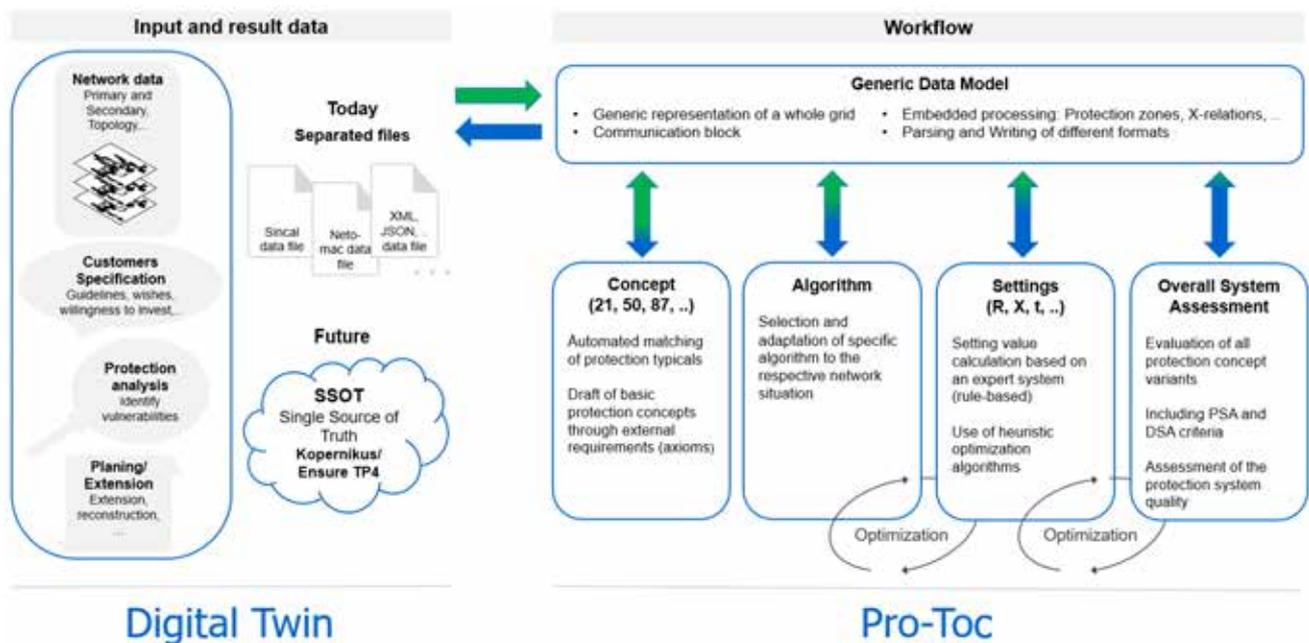


Abbildung 4: Aufbau und Ablauf der Pro-Toc sowie Anbindung an den im TP4 entwickelten digitalen Zwilling

5 InnoSys 2030

Das Forschungsprojekt InnoSys 2030 (gefördert durch BMWi) untersucht neue innovative Ansätze in der Systemführung, die eine effizientere Nutzung des verfügbaren Netzes ermöglichen. Ziel ist die Netzintegration eines höheren Anteils erneuerbarer Energien bei mindestens gleichbleibender Systemsicherheit.

In InnoSys 2030 arbeitet der LEES an der Entwicklung automatisierter Systemführungsprozesse, unter dem Aspekt der Stabilitätsbewertung und der dynamischen Adaption intelligenter Aktoren. Zu den betrachteten Aktoren des LEES gehören sowohl leistungselektronische Stellglieder, wie HGÜs und Netzbooster, als auch der Netzschutz. Durch die aktive und systemdienliche Steuerung derzeit rein passiv betriebener Aktoren, werden kurative Betriebsführungsprozesse ermöglicht und können den klassischen rein präventiven Konzepten gegenübergestellt werden. Dies erlaubt eine Beurteilung des Einflusses kurativer Maßnahmen auf die Systemsicherheit. Darüber hinaus beteiligt sich der LEES mit mehreren Partnern an der Entwicklung des zukünftig notwendigen Prozesses für die Netzsicherheitsrechnung. Dieser sogenannte Assessment Prozess kombiniert stationäre und dynamische Netzsicherheitsrechnung in einem gemeinsamen Optimierungsprozess und soll so die kurative Systemführung ermöglichen. Neben der theoretischen Entwicklung des Prozesses steht dessen Umsetzung sowohl in der Simulation als auch der Demonstration im Fokus sowie der Einsatz und

die Entwicklung von Tools zur Netzsicherheitsrechnung. Hierzu arbeitet der LEES mit verschiedenen Partnern wie der RTWH³, der TUIL⁴, dem Fraunhofer IEE⁵ und den Übertragungsnetzbetreibern zusammen.

Grundlegendes Element für die Netzsicherheitsrechnung ist das Engpasskonzept, das die verschiedenen physikalisch und technisch begrenzenden Faktoren der Netzauslastung berücksichtigt. Auch der Netzschutz stellt eine dieser Begrenzungen innerhalb des Engpasskonzeptes dar. Damit höhere Netzauslastungen bei gleichbleibender Systemsicherheit ermöglicht werden, untersucht der LEES in Zusammenarbeit mit den Schutzexperten der Übertragungsnetzbetreiber verschiedene Lösungsansätze sowohl auf Relaisebene als auch auf Systemebene. Auf Relaisebene reichen diese von der Anpassung von Sicherheitsfaktoren bis hin zu tiefgreifenden, auch herstellerseitigen Maßnahmen. Auf Systemebene soll eine engere Verzahnung mit der Systemführung die Schutzsicherheit erhöhen und bietet darüber hinaus weiteres Potential für eine höhere Netzauslastung. Eine signifikant höhere Auslastung der Netze wird wahrscheinlich eine Kombination der verschiedenen Lösungsansätze auf Relais- und Systemebene benötigen.

6 Schlussworte

Die Arbeitsgebiete des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme im Forschungsbereich Netze sind von hoher Bedeutung zur Aufrechterhaltung einer hohen Versorgungssicherheit und Zuverlässigkeit in der deutschen Energieversorgung, was durch die intensive Zusammenarbeit mit Übertragungsnetzbetreibern deutlich wird. Die intensiven Kooperationen mit Forschungseinrichtungen, Herstellern und Netzbetreibern stärken zudem das zukünftige Potential von Forschung und Entwicklung in der Metropolregion Nürnberg, Fürth, Erlangen.

7 Vorträge & Poster 2020

- [1] S. Resch. Real time simulation for PHIL applications in a microgrid testbed. RTDS Technologies User Spotlight Series, 2020.
- [2] T. Wagner, G. Mehlmann, M. Richter, D. Preis. Feasibility Study for the Implementation of a Digital Twin in a Low-Voltage Grid Area. RTDS Technologies User Spotlight Series, 2020.
- [3] R. Dimitrovski. Enhanced Multi-mass Model in RSCAD. RTDS Technologies User Spotlight Series, 2020.
- [4] A. Raab, C. Scheibe. Co-Simulation zwischen PSS[®]NETOMAC und Simulink. PSS NETOMAC Virtual User Forum 12/2020. Erlangen, DE, 2020

8 Veröffentlichungen 2020

- [5] T. Wagner; G. Mehlmann; M. Richter. Application of the Digital Twin Concept for a Distribution Network; Proceedings of the IEEE Power and Energy Student Summit (PESS 2020). Darmstadt, DE, 2020
- [6] S. Resch; M. Luther. The Combination of Single- and Three-Phase Inverters into a Hybrid Energy Storage System. Proceedings of the 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). Delft, NL, 2020
- [7] S. Resch; M. Luther. Reduction of Battery-Aging of a Hybrid Lithium-Ion and Vanadium-Redox-Flow Storage System in a Microgrid Application. Proceedings of the 2020 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES). Cagliari, IT, 2020
- [8] L. Graf; S. Resch. Consideration of time delays in real-time simulation of a voltage sourced converter. Proceedings of the IEEE Power and Energy Student Summit (PESS 2020). Darmstadt, DE, 2020
- [9] G. J. Meyer; T. Lorz; R. Wehner; J. Jäger; M. Dauer; R. Krebs. Hybrid Fuzzy Evaluation Algorithm for Power System Protection Security Assessment. Electric Power Systems Research Volume 189, Elsevier, December 2020

³ Rheinisch Westfälische Hochschule Aachen, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft

⁴ Technische Universität Ilmenau

⁵ Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

FORSCHUNGSBEREICH

Speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
juergen.karl@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 9021

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 A

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU - Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (EVT) FAU - Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (IPAT) FAU - Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik (CRT) THN - Fakultät Werkstofftechnik (THN) FAU - Lehrstuhl für thermische Verfahrenstechnik (TVT) FAU - Lehrstuhl technische Thermodynamik (LTT) ZAE / FAU – Lehrstuhl für Materialien der Elektronik und der Energietechnik. (i-MEET) FAU - Lehrstuhl für Rechnernetze und Kommunikationssysteme (INF7)	TP SP1-1: Aufwertung von Niedertemperaturwärme mit reversiblen HP-ORC-Systemen TP SP1-2: Große Niedertemperatur-Speicher für Temperaturen bis 150°C TP SP2 : Spitzenlastfähige Hochtemperatur-Speicher TP SP3 : Dynamisches Verhalten von Power-to-Gas und Power-to-Liquid Synthesen

Projektbericht 2020

Der Projektteil „Speicher mit Systemrelevanz bis 2022“ fokussiert auf Technologien und Konzepte, die es erlauben, elektrische Energie aus Wind und Photovoltaik kurzfristig, innerhalb der nächsten 10-15 Jahre, möglichst bis 2022,

- mit hoher Effizienz, d.h. mit Speicherwirkungsgraden > 50 %
- mit hoher Leistung, mit ca. 10-20 GW_{el}
- mit hoher Kapazität, für ca. 10-20 TWh

und damit in systemrelevanten Größenordnungen zu speichern. Entsprechend dieser drei Speicheraufgaben und -strategien werden in den Teilprojekten Konzepte erarbeitet und als Prototypen demonstriert. Zu Beginn des Jahres war der Aufbau der großen Versuchsanlagen im neu bezogenen „Speicherhaus“ in vollem Gange. Trotz der Einschränkungen durch die Corona Pandemie konnten die Versuchsanlagen teilweise fertiggestellt und in Betrieb genommen werden. So konnten insbesondere die reversible 20 kW_{el} HP-ORC Anlage und der zugehörige Niedertemperatur-Speicher (SP1) sowie der Hochtemperatur-Carbonatspeicher und der Prüfstand für thermische Speichermassen (beide SP2) überwiegend aufgebaut und teilweise in Betrieb genommen. Im Teilprojekt SP3 wurden zwei innovative Reaktorkonzepte realisiert, die beide bereits in mehreren Folgeprojekten zum Einsatz kommen. Von den Einschränkungen des Versuchsprogramms blieben theoretische Arbeiten, Modellierungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen weitgehend unberührt. Dennoch kam es in den Zeitplänen der Teilprojekte auch zu Verzögerungen und ein Teil der Arbeiten musste in das Projektjahr 2021 verschoben werden.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR
Prof. Dr. Jürgen Karl

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Juergen.karl@fau.de

Telefon
+49 911 5302 9021

Web
www.encn.de

1 Aufwertung von Niedertemperaturwärme mit reversiblen HP-ORC-Systemen (SP1-1)

1.1 Thermodynamische Kreisprozesssimulation und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Bernd Eppinger, Lars Zigan, Stefan Will (LTT)

Neben der thermodynamischen Betrachtung der Kreisprozesse, s. B. Eppinger et al., Appl. Energy (2020), und Abbildung 1, stand in diesem Jahr vor allem die wirtschaftliche Seite des Projektes im Fokus der Arbeiten. In Kombination mit den durchgeführten Kreisprozesssimulationen und deren Optimierung nach nicht nur thermodynamischen, sondern ökonomischen Gesichtspunkten, konnten wichtige Erkenntnisse über das Zusammenspiel aus Fluidauswahl und Anlagenkonzeption gewonnen werden.

Für die wirtschaftliche Bewertung und Vergleichbarkeit der Speicherkosten wird eine Kenngröße analog zu den Stromgestehungskosten im traditionellen Energiemarkt verwendet. Durch die Speichergestehungskosten (Levelized Cost of Storage, LCOS) können auch technologieunabhängige Vergleiche durchgeführt werden. Hierbei zeigt sich, dass bei einer reinen Berücksichtigung der LCOS die Anlagenlebensdauer eine der entscheidenden Größen für eine erfolgreiche Anwendung der Pumped Thermal Energy Storages im Energiemarkt der Zukunft darstellt. Mangels praktischer Erfahrungswerte konnten bisher jedoch nur Abschätzungen mit der Gesamtlebensdauer der Anlage durchgeführt werden. Reale Werte dürften unter den Veranschlagten liegen, da teils nicht im Langzeiteinsatz erprobte Komponenten, wie der thermische Speicher selbst, verwendet werden. Bei einer angenommenen Anlagenlebensdauer von 20 Jahren können ohne Berücksichtigung von Skalierungseffekten bereits 23 ct/kWh als LCOS erreicht werden, siehe Abbildung 2.. Zusätzlich zu den LCOS fallen noch die Kosten für den zu speichernden Strom an, durch günstigen Solarstrom oder Schwankungen des Strompreises an der Börse können diese niedrig oder gar negativ ausfallen. Diese Effekte und das Angebot von positiver und negativer Sekundärregelleistung als zusätzliche Verdienstquelle werden aktuell untersucht.

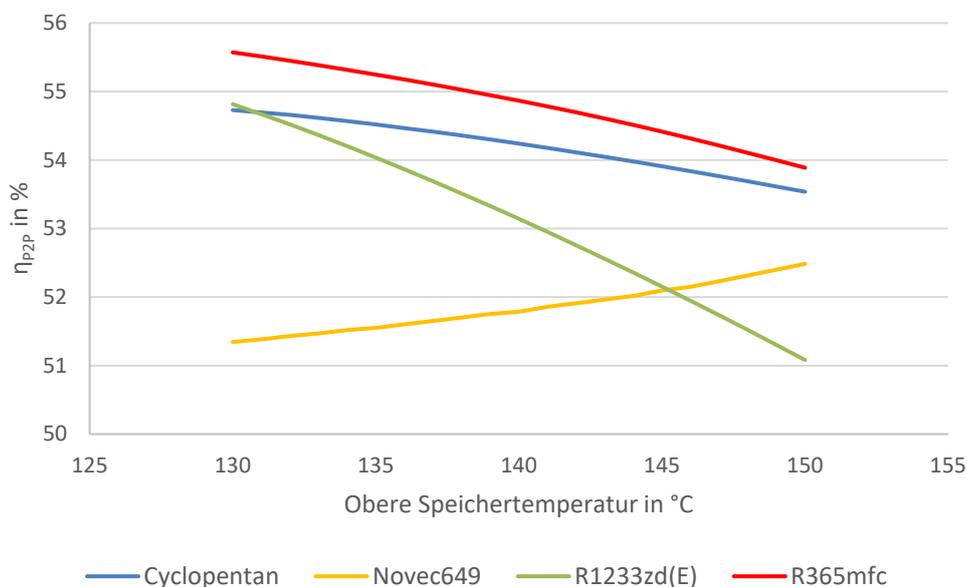


Abbildung 1: Power-to-Power-Wirkungsgrad in Abhängigkeit der oberen Speichertemperatur bei konstantem Speicherhub von 40 °C nach B. Eppinger et al. 2020

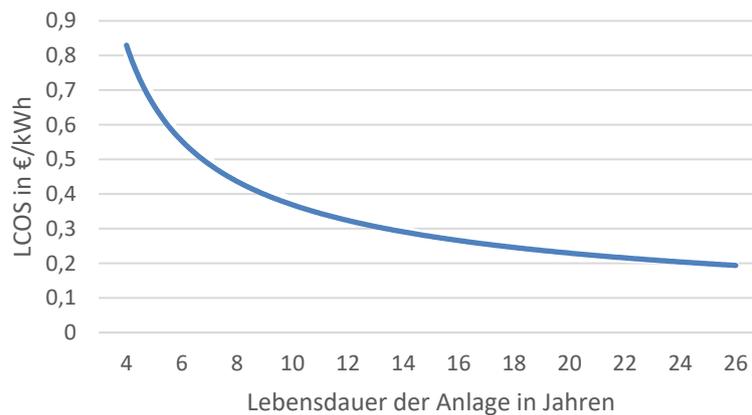


Abbildung 2: Speichergestehungskosten (Levelized Cost of Storage) in Abhängigkeit der geplanten Betriebsdauer der Anlage

1.2 Aufbau und Demonstration einer 20 kW_{eI} HP-ORC Anlage

Daniel Steger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Mit dem Umzug der Pilotanlage ins Technikum „Speicherhaus“ am EnCN wurde Ende 2019 ein wichtiger Meilenstein gesetzt. Seitdem erfolgten die Fertigstellung des Aufbaus und der Beginn der Inbetriebnahme vor Ort. Im vergangenen Projektjahr 2020 sind mit dem Kühlkreislauf und dem Heizkreislauf die zwei Peripherie-Teile der Anlage in Betrieb genommen worden. In die Anlage wurden weitere Sensoren eingebaut und das Steuerungsprogramm entsprechend angepasst. Außerdem konnte die Anlage in mehreren Iterationsschritten abgedichtet werden, wobei an einigen Stellen die Dichtkonzepte überarbeitet werden mussten. Die Programmierung des rückspeisefähigen Frequenzumrichters für die kombinierte Verdichter-Expander-Einheit hatte außerdem einen großen Anteil an der Arbeit im vergangenen Projektjahr.



Abbildung 3: Aktuelle Ansicht der Pilotanlage (von oben)

Das Teilprojekt Speicher A TP 1.1 wird am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter bearbeitet. Dabei gibt es einen engen Austausch zu anderen Lehrstühlen im Projekt, im Besonderen zum Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (EVT), zum Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) und zum Lehrstuhl für Rechnernetze und Kommunikationssysteme (INF7).

Die Fördermittel wurden im vergangenen Jahr nicht vollständig ausgeschöpft, da der praktische Aufbau und damit die Bestellung von Komponenten besonders im Frühjahr durch die anhaltende Corona-Pandemie nur eingeschränkt stattfinden konnte. Es wird davon ausgegangen, dass nach der Durchführung von ersten Testreihen noch einzelne Komponenten neu bestellt und ausgetauscht werden müssen. Die Verwendung der Fördermittel verlagert sich entsprechend in das kommende Projektjahr.

Im Frühjahr 2021 ist mit der Fertigstellung der Pilotanlage und dem Beginn erster Testreihen zu rechnen. Wenn auch die Corona-bedingte Verzögerung im vergangenen Jahr den Start der Testphase um ein paar Monate verzögert hat, kann aus momentaner Sicht dennoch weiterhin mit dem Erreichen der Projektziele bis zum Projektende gerechnet werden.

1.3 Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für die Modellregion Wunsiedel

Tanja Schneider, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Die Arbeiten in diesem Teilvorhaben wurden bereits planmäßig im Vorjahr abgeschlossen.

2 Große Niedertemperatur-Speicher für Temperaturen bis 150°C (SP1-2)

2.1 Sensibler Wärmespeicher für aufgewertete Niedertemperaturwärme

Christoph Regensburger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Das Projekt Niedertemperatur-Speicher wird von Christoph Regensburger am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik unter Leitung von Professor Dr.-Ing. E. Schlücker bearbeitet. Die Projektdurchführung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Teilprojekte **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., und Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die regelmäßigen Besprechungen fanden aufgrund des Corona Virus in digitaler Form statt.

Die Projektmittel des Teilprojekts sind nahezu ausgeschöpft, für das Jahr 2021 sind laut Antrag keine weiteren Projektmittel vorgesehen, zu vollständigen Bearbeitung des Projekts nach Antrag ist eine Übertragung der Restmittel aus dem Vorjahr notwendig.

Die Verrohrungsarbeiten an der Anlage wurden abgeschlossen. Dazu wurden kritische Rohrabschnitte flexibilisiert um die Dichtigkeit und gleichzeitig spannungsarme Montage zu gewährleisten. Nach dem Austausch des Volumenstrommessgeräts wird nun der notwendige Volumenstrom im Speichersystem erreicht, der eine vollständige Auslastung des HP-ORC Prozesses in jedem Betriebszustand ermöglicht.

Die Programmierung der Anlagensteuerung ist weitestgehend abgeschlossen. Die aktuelle Version der Steuerung ermöglicht den Betrieb aller Anlagenkomponenten und die Aufnahme von Messwerten. Lediglich letzte Hallensignale und Teile der Temperaturmesstechnik sind noch einzubinden. Die Isolierung der Behälter ist, bis auf geringe Nacharbeiten fertiggestellt und funktionsfähig. Die Rohrisolierung steht noch aus.

Aufgrund der Corona Pandemie mussten die Aufbauarbeiten im ersten und zweiten Quartal auf nahezu null reduziert werden und konnten erst im Verlauf der zweiten Jahreshälfte neu anlaufen. Dadurch wurde die Fertigstellung der Anlage signifikant verzögert und finale Investitionen konnten nicht mehr getätigt werden, da dazu zunächst ein heißer Betrieb der Anlage notwendig ist.



Abbildung 4: Aktueller Stand des Anlagenaufbaus des Speichersystems im Projekt Speicher A Teilprojekt 1.2 Niedertemperatur Speicher bis 150°C

Situationsbedingt wurde die theoretische Weiterentwicklung des Speichersystems intensiviert. Dazu wurden theoretische Speicherkonzepte entwickelt und ausgearbeitet, die mit dem aktuellen sensiblen Speichersystem, mit keinen oder geringen baulichen Änderungen, abgebildet werden können. Eines dieser Speicherkonzepte wurde auf der virtuellen „International Conference on Applied Energy“ von Elsevier in Bangkok vorgestellt. Idee des Konzepts ist die Trennung von heißem und kaltem Speichermedium durch eine zweite Phase die Exergieverluste durch Vermischung reduziert.

Die warme Inbetriebnahme des Speichers ist für das erste Quartal 2021 geplant. Parallel sind der Aufbau und die Validierung einer Simulation des Speichersystems geplant. Damit können mehrere Speicherkonfigurationen simuliert und bei vielversprechenden Ergebnissen in das physikalische Speichersystem integriert werden. Ziel ist die Optimierung des Speichersystems auf das Betriebsverhalten des angehängten HP-ORC Prozesses aus dem Teilprojekt Speicher A TP 1-1, Kapitel 1.2 – Aufbau und Demonstration einer 20 kWel HP-ORC Anlage.

2.2 Entwicklung druckloser Latentwärme-Speicherkonzepte für Temperaturen bis 150°C

Simon Pöllinger (ZAE)

Die Arbeiten in diesem Teilvorhaben wurden bereits planmäßig im Vorjahr abgeschlossen.

2.3 Dynamische Simulation der Energieflüsse und Speicherung der Abwärme von Rechenzentren und der Integration großer Speicher in Nahwärmenetze

Peter Bazan, Daniel Scharrer, Reinhard German (INF7)

Die Arbeiten in diesem Teilvorhaben wurden bereits planmäßig im Vorjahr abgeschlossen.

3 Spitzenlastfähige Hochtemperatur-Speicher (SP2)

3.1 Dynamische Speicherung von Überschussstrom in isothermen Heatpipe-Carbonatspeichern

Christoph Lange, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

3.1.1 Aufbau der Pilotanlage im 250 kWh Maßstab im Speicherhaus

Der Reaktor und der zur Pilotanlage gehörende Dampferzeuger wurden im Frühjahr geliefert und im Rahmen der möglichen Präsenzarbeit während und nach dem ersten Lockdown montiert. Nach Fertigstellung der Statik des Gerüsts wurde dieses im April installiert. Der Schaltschrank für die Pilotanlage wurde im Juli geliefert und die SPS-Programmierung der Steuerung im Rahmen einer Abschlussarbeit parallel zur Fertigung des Schaltschranks erstellt. Seit August ist die Anlage bedienbar, allerdings noch nicht vollständig montiert.



Abbildung 5: Carbonatspeicher im Speicherhaus

Anschließend wurde der Aufbau der Peripherie vorangetrieben. Zunächst stand die Fertigung, Prüfung und der Funktionstest von 12 natriumgefüllten Hochtemperatur-Heatpipes im Fokus. Im Sommer wurden die Gasverteiler im Reaktor sowie sämtliche Sensorik (u.a. Dampfmesstrecke für die Bilanzierung der Entladung des Speichers, CO₂-

Durchflussmesser für die Bilanzierung der Beladung, knapp 200 Thermoelemente und entsprechende Positionierhilfen zur Bestimmung von Temperaturprofilen im Reaktor) für den Carbonatspeicher ausgelegt und notwendige Komponenten gezeichnet/bestellt. Im Herbst wurden die Rohrleitungen für die Gaszufuhr installiert sowie die Gasverteiler gefertigt.

Anfang 2021 erfolgt die Komplett-Installation aller Komponenten, wobei seit Dezember Corona-bedingte Einschränkungen im Laborbetrieb Schwierigkeiten bereiten.

3.1.2 Versuchsreihen am Mini-Carbonatspeicher

Im Jahr 2020 wurden zwei komplette Versuchsreihen ($R = 1$ und $R = 2$) à 6 Zyklen (1 Zyklus = Kalzinierung und anschließende Karbonisierung) am Mini-Carbonatspeicher durchgeführt. Ziel der Versuche war die Bewertung der Zyklenstabilität und damit auch der Speicherkapazität in Abhängigkeit von den gewählten Reaktionsparametern. Daraus lassen sich dann optimale Betriebsparameter für den Speicherbetrieb ableiten. Hauptaugenmerk liegt zunächst auf der Bestimmung sinnvoller Kalzinierungsbedingungen. So wurden die Versuchsparameter der Versuchsreihen wie folgt gewählt. Von Reihe 3 wurde 2020 erst 1 Zyklus durchgeführt, sodass dort noch keine vollständigen Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Versuchsparameter der zyklischen Versuchsreihen

	Versuchsreihe >	R = 1	R = 2	R = 3 → 2021	R = 4 → 2021
Kalzinierung	T_{soll} [°C]	850	800	900	900
	N_2 [l _N /min]	20	30	5	5 CO ₂
Karbonisierung	T_{soll} [°C]	800	800	800	800
	CO ₂ [l _N /min]	30	30	30	30

In Abbildung 6 ist der Umsatz (und damit die Zyklenstabilität) des CaO im Reaktor angegeben, welches zu CaCO₃ reagiert, außerdem die zur Verfügung stehende Entladekapazität des enthaltenen Materials beim jeweiligen Zyklus. Beim ersten Zyklus sind über 70 % des CaO im Reaktor reaktionsfähig, nach 6 Zyklen verbleiben rund 50 %. Das sind im Vergleich zur Literatur sehr hohe Werte (siehe Abbildung 7) was für die niedrigen Kalzinierungstemperaturen spricht. Allerdings lassen niedrigere Kalzinierungstemperaturen niedrigere Beladeleistungen bei der Kalzinierung zu, sodass der Speicher über eine längere Dauer beladen werden muss (vgl. Tabelle 2).

In Versuchsreihe 2 wurde eine höhere Entladekapazität erreicht, da durch Filter der Materialaustrag vermindert wurde und somit mehr Material von den ursprünglichen eingebrachten jeweils 20 kg im Reaktor zur Reaktion zur Verfügung stand.

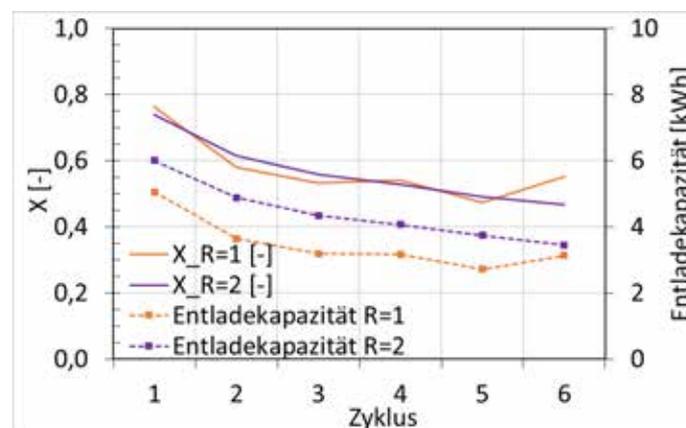


Abbildung 6: Entladekapazität und Zyklenstabilität des Mini-Carbonatspeichers bei Versuchsreihen 1 und 2

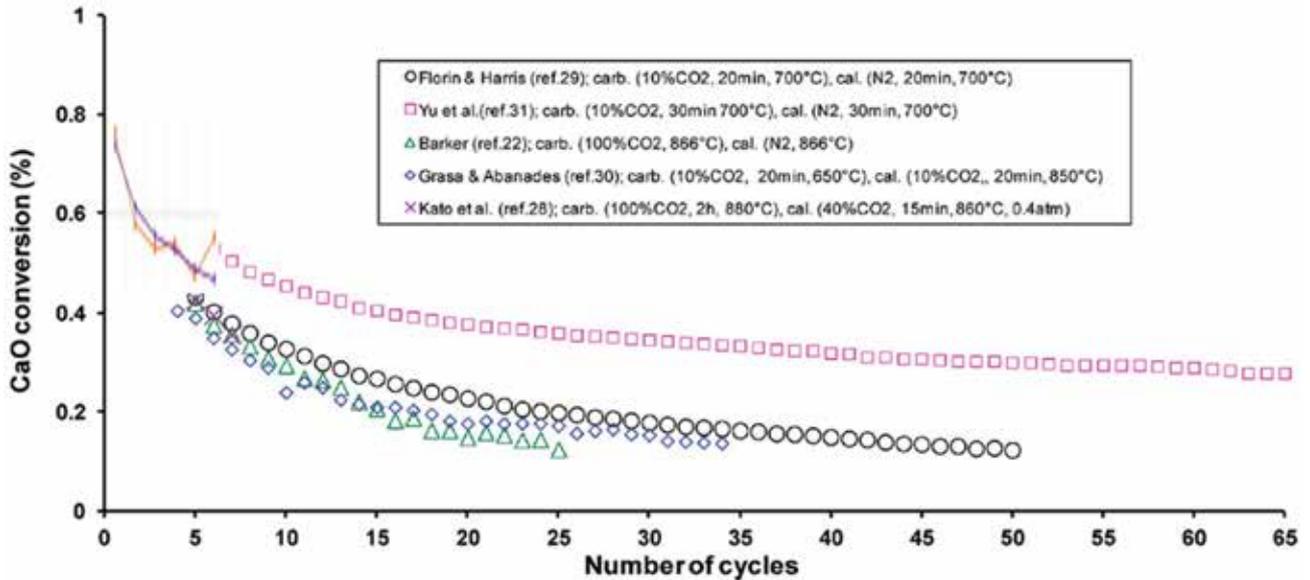


Abbildung 7: Zyklusstabilität aus Versuchsreihen 1 (orange) und 2 (violett) im Vergleich zur Literatur

In Abbildung 8 sind die realen Betriebsparameter der Versuchsreihen im Gleichgewichtsdiagramm aufgetragen. Jeder Punkt der Karbonisierung (links) beschreibt dabei den CO₂-Partialdruck am Austritt aus dem Reaktor aufgetragen über die Temperatur des Carbonatbetts gemittelt über 15 min. Je weiter weg der Punkt vom Gleichgewicht liegt, desto weiter fortgeschritten ist die Reaktion im Reaktor. Bei der Kalzinierung ist der Mittelwert über die erste Stunde der Reaktion aufgetragen, da diese meist an einem sehr konstanten Betriebspunkt verläuft.

Die eingezeichneten gestrichelten Linien beschreiben den Abstand zum chemischen Gleichgewicht des jeweiligen Betriebspunktes. Dabei ist der Partialdruck als Faktor hinterlegt. Bei der Karbonisierung kommt man nicht näher als 60 % (Faktor 1,6 x p_{CO₂,GGW}) an den Gleichgewichtspartialdruck, bei der Kalzinierung beträgt der Abstand zwischen 5 und 20 % (Faktor 0,95-0,8). Weiterhin wird der Abstand bei der Karbonisierung immer größer, da sich die Reaktion durch die sich aufbauende Diffusionsschicht von CaCO₃ verlangsamt und nur eine höhere Triebkraft zum Gleichgewicht die Diffusionslimitierung ausgleichen kann.

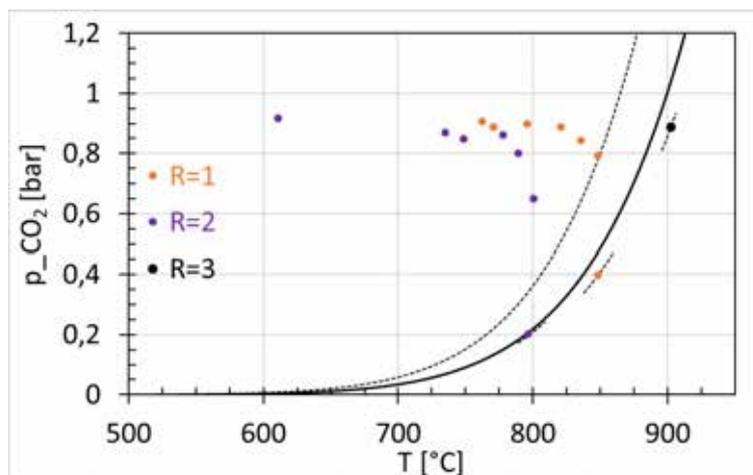


Abbildung 8: Betriebspunkte der Kalzinierung (jeweils bei Zyklus 1) und Karbonisierung (jeweils bei Zyklus 4) der Versuchsreihen 1, 2 und des ersten Betriebspunktes von Versuchsreihe 3 im Gleichgewichtsdiagramm der Reaktion $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$

Abbildung 9 zeigt die Konstanz der Betriebspunkte der Kalzinierung, allerdings wird hier auch der Unterschied in der möglichen Kalzinierungs-, und damit Beladeleistung, sichtbar. Je geringer die Temperatur, desto geringer die Leistung, dafür verlängert sich die Beladedauer. Bei der Betrachtung der Kurven ist allerdings zu beachten, dass die Leistung bei Versuchsreihe 3 nur bedingt vergleichbar ist, da diese beim ersten Zyklus, die anderen Kurven beim zweiten Zyklus aufgezeichnet wurden. Vom 2. Zyklus von R3 sind noch keine Daten vorhanden, aber die Leistung sollte etwas geringer ausfallen als dargestellt, da auch die Beladepazität vergleichbar zu Abbildung 6 sinkt.

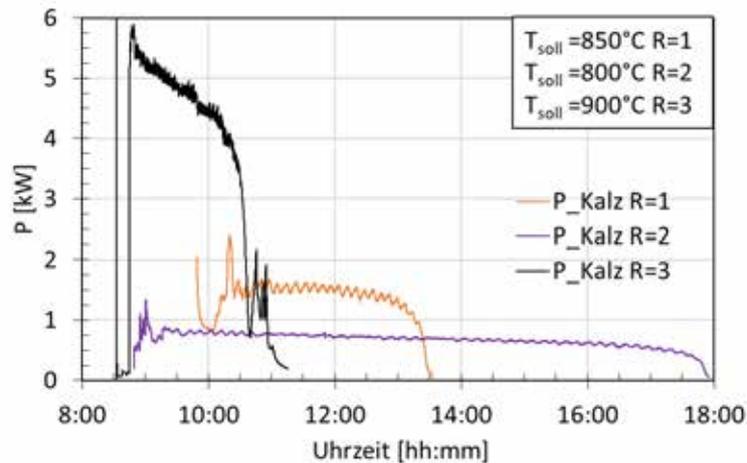


Abbildung 9: Beladeleistung (Kalzinierungsleistung) bei Versuchsreihen 1 und 2 (jeweils Zyklus 2) und Versuchsreihe 3 (Zyklus 1)

In Tabelle 2 werden die Auswirkungen der Kalzinierungstemperatur auf die Dauer der Beladung in Zahlen dargestellt. Weiterhin ist ersichtlich, dass bei Reihe 1 eine geringere Masse im Reaktor auch zu einer geringeren Speicherkapazität geführt hat. Wäre der Austrag vergleichbar mit Reihe 2, wäre die Beladeleistung in Reihe 1 vermutlich knapp über 2 kW.

Tabelle 2: Vergleich von Beladekapazität, Beladedauer und maximaler Beladeleistung bei verschiedenen Kalzinierungstemperaturen

	Zyklus	T_Kalz	P_Max	Laufzeit	Kapazität
R = 2	2	800 °C	0,85 kW	8,7 h	4,9 kWh
R = 1	2	850 °C	1,6 kW	3,5 h	3,6 kWh

Die Karbonisierung startet in den aufgezeichneten Versuchen direkt nach Abschluss der Karbonisierung, also bei Reihe 1 bei 850°C mittlerer Wirbelschichttemperatur und bei Reihe 2 bei 800°C. Die Karbonisierungsleistung bewegt sich zu Beginn um 3/2,5 kW (R2/R1), sinkt allerdings innerhalb der ersten 45 min um ca. 1 kW. Die maximale Reaktionsleistung von ca. 3-3,5 kW ist durch die Zugabe von 30 l_N/min CO₂ limitiert. Insgesamt ist bei Reihe 2 eine etwas höhere Reaktionsleistung zu beobachten, da sich durch verringerten Austrag noch mehr Material im Reaktor befindet.

Nach dem Absinken der Leistung ist normalerweise eine leichte Stabilisierung zu beobachten, stellenweise sind aber auch erneute Spitzenleistungen wie zu Beginn der Reaktion zu beobachten, wenn kurzzeitig nahezu das gesamte zugegebene CO₂ vom CaO absorbiert wird. Dies führt auch zu Temperaturspitzen im Bett. Die Ungleichmäßigkeit der Reaktion ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass durch die hohen Absorptionsraten (ca. 90 %) im oberen Bereich der Wirbelschicht zu Beginn kaum CO₂ ankommt und sich Festbettzustände und Kanäle ausbilden, sodass eine schlechte Durchmischung vorliegt. Wenn sich kurzfristig durch verstärkte lokale Blasenbildung die Durchmischung der Wirbelschicht verbessert, kommt noch frisches CaO mit CO₂ in Kontakt und reagiert verstärkt.

Der Reaktor ist bei der Karbonisierung nur durch die eigene Reaktionswärme beheizt, während ein Teil der freigesetzten Wärme in den Dampferzeuger abgeführt wird. Im Verlauf des Versuchs kühlt das Bett leicht ab, insbesondere wenn die Wärmeabfuhr zum Dampferzeuger und die Wärmeverluste durch Isolierung und ausströmendes Gas höher sind als die Reaktionsleistung. Wenn die Reaktionsleistung einen Wert von ca. 1,5 kW unterschreitet wird die Wärmeabfuhr in den Dampferzeuger durch Einfahren des isolierenden Regelstabs unterbunden. Um ein Abkühlen zu vermeiden, muss die Reaktionsleistung immer größer als 1 kW sein, deshalb wurde bei Versuchsreihe 1 unter 1 kW Leistung die Reaktion abgebrochen. Um später eine bessere Vergleichbarkeit mit dem großen Carbonatspeicher zu erzielen, der nicht so stark durch Wärmeverluste limitiert ist, wurde bei Versuchsreihe 2 die Reaktion bis zu einer Leistung von ca. 0,6 kW am Laufen gehalten.

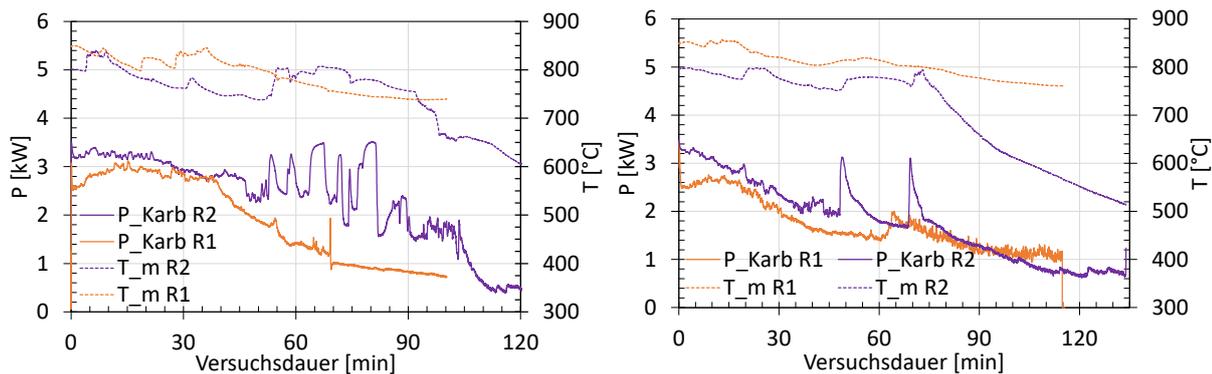


Abbildung 10: Entladeleistung (Karbonisierungsleistung) und mittlere Wirbelschichttemperatur im Vergleich: links: R1 und R2 bei Zyklus 2, rechts: R1 und R2 bei Zyklus 4

3.1.3 Thermodynamische Bewertung der Integration des Carbonatspeichers ins Heizkraftwerk Sandreuth

Zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten des Carbonatspeichers in Kraftwerksschaltungen ist im Jahr 2020 die thermodynamische Simulation mittels IPSEPro angelaufen. Dafür wurden freundlicherweise vom Heizkraftwerk Sandreuth Jahresdaten sowie die Kraftwerksschaltung zur Verfügung gestellt, um diese in der Simulation nachzubauen. Anschließend wurde der Carbonatspeicher zur dynamischen Dampferzeugung vorläufig als einfacher Dampfkessel simuliert, mit dem kurzfristig bis zu 20 MW Leistung an das Kraftwerk abgegeben werden kann. Damit soll das Kraftwerk in die Lage versetzt werden, kurzfristig entweder die Stromproduktion oder die Fernwärmeversorgung zu erhöhen. Folgende Varianten der Einspeisung werden in Betracht gezogen:

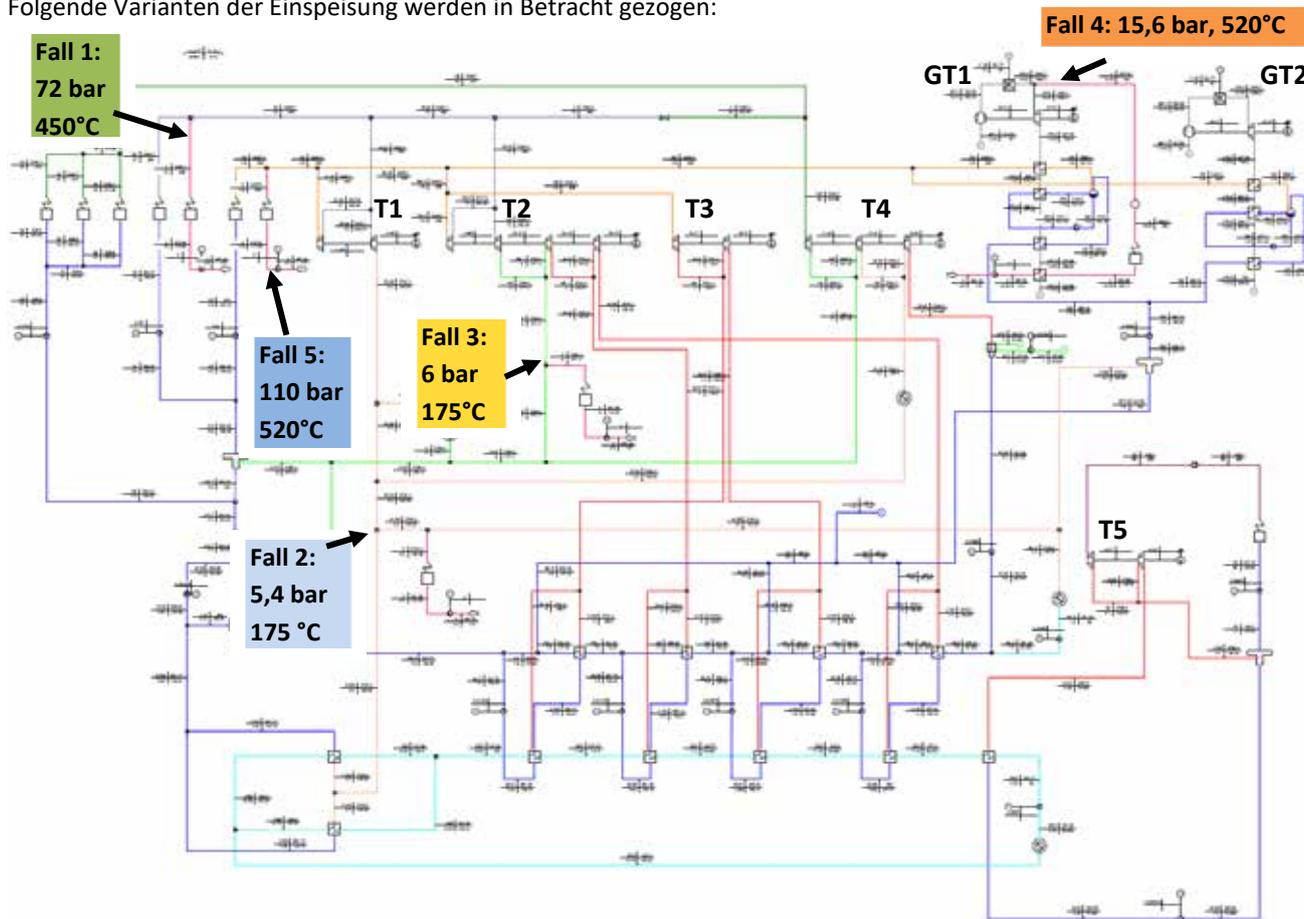


Abbildung 11: Mögliche Positionen zur Einbindung des Carbonatspeichers im Heizkraftwerk Sandreuth am Schaltbild in IPSEPro

Tabelle 3: Einspeiseparameter verschiedener Entladepunkte des Carbonatspeichers im Heizkraftwerk Sandreuth

Position	Druck	Temperatur	Funktion der Wärmezufuhr
1	72 bar	450 °C	Hochdruckdampf zur Stromerzeugung
2	3,8-5,4 bar	145-175 °C	Zusätzlicher Fernwärmedampf
3	6 bar	160-175 °C	Speisewasservorwärmung
4	15,6 bar	520 °C	Injektion in Gasturbine
5	110 bar	520 °C	Hochdruckdampf zur Stromerzeugung

Diese fünf Einspeisepunkte werden anschließend mit Daten von verschiedenen Jahreszeiten kombiniert, um die Effizienz der Leistungssteigerung sowie die Auswirkungen auf die Steigerung der elektrischen Leistung sowie der Wärmeleistung des Kraftwerkes zu untersuchen. Die untersuchten Jahreszeiten sind:

1. Winter – ein Hochdruckkessel, Müllverbrennung, beide Gasturbinen laufen, hoher Fernwärmebedarf
2. Frühling – Müllverbrennung und eine Gasturbine laufen, mittlerer Fernwärmebedarf
3. Sommer – nur Müllverbrennungskessel laufen, kaum Fernwärmebedarf

Aktuell ist lediglich die Auswertung der Frühlingssimulation abgeschlossen, die weiteren Simulationen folgen.

Frühlingssimulation

Folgende Parameter liegen der Frühlingssimulation zu Grunde, bevor die zusätzliche Wärme durch Dampfproduktion mit Hilfe des Carbonatspeichers dem Kraftwerk zugegeben wird.

Tabelle 4: Leistungsparameter des Heizkraftwerks Sandreuth vor der Frühlingssimulation

Feuerungswärmeleistung Q_{FWL}	Elektrische Leistung P_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad η_{el}	Fernwärmeleistung P_{FW}	Gesamtwirkungsgrad Kraftwerk $(P_{el} + P_{FW})/(Q_{FWL})$
194,1 MW	61,1 MW	31,5 %	86,2 MW	75,9 %

Turbine 1, Turbine 3 und Gasturbine 2 sind zu diesem Zeitpunkt des Jahres meist bereits abgeschaltet, da das Kraftwerk im Normalfall wärmegeführt betrieben wird. Demnach beziehen diese Turbinen auch keinen zusätzlichen Dampf aus dem Speicherdampferzeuger in der Simulation. Das Biomassekraftwerk mit Kessel und Turbine 5 läuft auch getrennt von den anderen Turbinen, sodass die elektrische Leistungsproduktion dort nicht durch Einspeisung von zusätzlichem Dampf beeinflusst wird.

Tabelle 5: Turbinenauslastung des Heizkraftwerks Sandreuth vor der Frühlingssimulation

Turbinen-Auslastung	Turbine 1	Turbine 2	Turbine 3	Turbine 4	Turbine 5	Gasturbine 1	Gasturbine 2
P_{el}	0 MW	9,1 MW	0 MW	16,5 MW	5,6 MW	29,9 MW	0 MW
Max. P_{el}	17 MW	44 MW	44 MW	25,4 MW	6 MW	47 MW	47 MW

Zu diesen Daten wird nun von 1 bis 20 MW in 1 MW Schritten Dampfleistung hinzugegeben entsprechend der in Tabelle 3 definierten Parameter und Einspeisepunkte. Das Wasser zur Dampferzeugung wird dabei aus dem Heißwasserspeicher bei 110 °C entnommen und nach der Nutzung zur Strom- bzw. Fernwärmeerzeugung wieder in den Heißwasserspeicher zurückgeführt. Dadurch wird der Massenstrom im System kurzzeitig erhöht. Dabei ist vorrangiges Ziel die kurzfristige Steigerung der elektrischen Leistung des Kraftwerkes.

Bei Fall 1 und 5 (Hochdruckdampf) geschieht der größte Teil der Leistungssteigerung in Turbine 2 (4,5/3,9 MW), während Turbine 4 nur 1,4/1,5 MW zusätzliche elektrische Leistung bringt.

Die Einspeisung in die Niederdruckschienen bei 5,4 bzw. 6 bar (Fall 2 und 3) bringt Leistungssteigerungen von insgesamt 3,3 bzw. 3,5 MW relativ gleichverteilt auf Turbinen 2 und 4, da durch den erhöhten Massenstrom im System mehr Dampf durch die Turbinen geht und relativ gesehen weniger Wärme vom Turbinenabdruck für die Fernwärmenetze bereitgestellt werden muss.

Bei Zugabe von Dampf zur Gasturbine steigt die Gasturbinenleistung um 4,3 MW (bei 20 MW Zugabe), die Leistung der Dampfturbinen wird kaum beeinflusst, da der höhere Massenstrom durch den Abhitzeessel auch mit niedrigeren Temperaturen einhergeht und somit kaum zusätzlicher Dampf für die Dampfturbinen produziert wird. Die Steigerung der Summe der elektrischen Leistung ist in Abbildung 12 links dargestellt.

Bei einer Einspeisung von 20 MW Dampf auf 110 bar Niveau (Fall 5) ist eine maximale elektrische Leistungssteigerung des Kraftwerks von 5,9 MW möglich. Das entspricht einer kurzfristigen Erhöhung der elektrischen Kraftwerksleistung um 9,7 %. Auf der 110 bar Schiene ist die Leistungssteigerung auch am effizientesten mit knapp 30 % η_{el} (Abbildung 12 rechts). Danach folgt die 72 bar Schiene (Fall 1) und die Einspeisung in die Gasturbinenbrennkammer (Fall 4). Mit absteigendem Druck der Einspeisung sinkt auch die Effizienz der Stromerzeugung aus der vom Speicherdampferzeuger eingespeisten Wärme. Der Dampferzeugerwirkungsgrad ist hier noch nicht berücksichtigt.

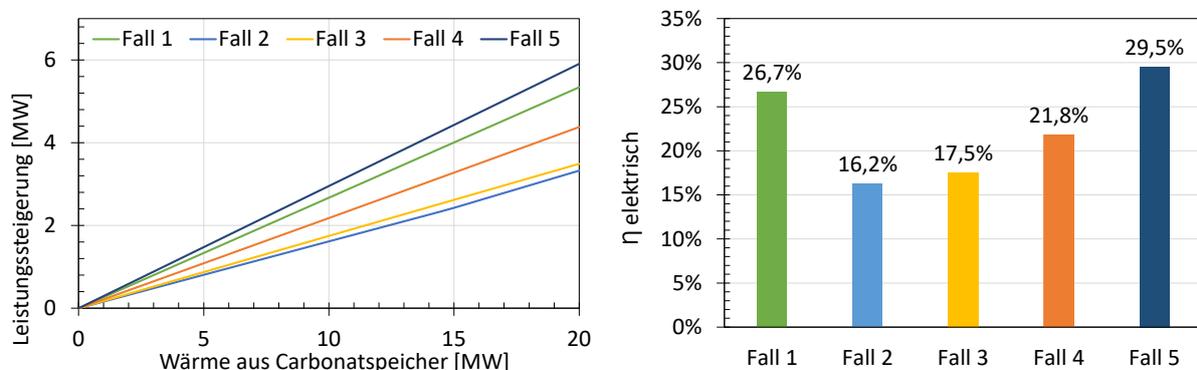


Abbildung 12: Frühlingsimulation der Dampfzugabe aus dem Carbonatspeicher (Dampferzeugerverluste und -wirkungsgrad vom Carbonatspeicher noch nicht berücksichtigt; links: el. Leistung bei steigender Einspeiseleistung, rechts: el. Wirkungsgrad bei 20 MW Dampferzeugung an verschiedenen Positionen im Kraftwerk)

Zusätzlich zur elektrischen Leistungssteigerung wird ein Teil der eingespeisten Wärme auch in die Fernwärmenetze oder den Heißwasser-Wärmespeicher der N-ERGIE weitergeleitet. Mithilfe der Gesamtsumme aus zusätzlicher Fernwärme-/Heißwasserspeicherleistung und elektrischer Leistung können Gesamtwirkungsgrade ermittelt werden. Bezogen auf den eingespeisten Dampf (noch ohne Dampferzeugerwirkungsgrad) liegen diese bei allen Fällen, außer Fall 4, der Injektion in die Gasturbine, über 60 %. Bei der Gasturbine ist zwar eine schnelle Leistungssteigerung möglich, allerdings geht der eingespeiste Dampfstrom mit dem Abgas nach dem Abhitzeessel verloren, sodass nicht die komplette Wärme genutzt werden kann.

Zur Verknüpfung der Simulation mit dem Proof-of-Concept des Carbonatspeichers muss die Simulation noch um einige Komponenten erweitert werden. So soll am Ende abhängig von der Temperatur des Speichers, dem zugegebenem CO_2 -Strom zur Karbonisierung und ggf. der Einstellung am isolierenden Regelstab zum Dampferzeuger die Dampfeinspeisung ins Kraftwerk berechnet werden können.

3.2 Messung von Wärmeflüssen in Carbonat-Fest- und Wirbelbetten mittels aktiver Phosphorthermometrie

Andres Osvet, Christoph Brabec (iMEET/ZAE)

Die Arbeiten in diesem Teilvorhaben werden im kommenden Jahr mit Messungen am Carbonatspeicher abgeschlossen.

3.3 Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktdampferzeuger

Jan Sebastian Hildebrand, Wolfgang Krcmar (THN)

3.3.1 Einleitung

In diesem Teilprojekt wird u.a. mittels Finiter-Elemente-Simulationen eine Optimierung der äußeren Bauteilstruktur bzw. der Formsteingeometrie keramischer Ziegel- und Cordierit-Wärmespeichermassen durchgeführt. Das Ziel besteht darin, die thermischen Spannungen der keramischen Wärmespeichermassen bei instationären Aufheiz- und Abkühlprozessen zu minimieren, damit diese Werkstoffe für die thermische Speicherung und Direktdampferzeugung eingesetzt werden können. Darüber hinaus sollen die thermischen Speichermassen auch werkstoffseitig durch den Einsatz von Zuschlagsstoffen wie beispielsweise Porosierungsmitteln hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften verbessert werden. Das vorrangige Ziel besteht darin, die Thermoschockbeständigkeit der Speichermassen zu erhöhen. Dafür werden im Labor hergestellte keramische Speichermassen in einem eigens dafür angefertigten Prüfstand zyklisch aufgeheizt und mit Wasser abgeschreckt. Die so belasteten keramischen Speichermassen werden im Anschluss auf relevante werkstofftechnische Parameter untersucht.

3.3.2 Finite-Elemente-Simulation: Variation der Formsteingeometrie

Mittels der Finite-Elemente-Software „ANSYS“ wird das schlagartige Abschrecken keramischer Hohlkörper mit einer Temperatur von 520 °C in einem Wasserbad der Temperatur 20 °C simuliert. Dabei sind insbesondere die ersten 25 Sekunden von Bedeutung, da in diesem zeitlichen Bereich die maßgebenden Spitzen thermisch induzierter Spannungen auftreten. Über die Funktion „Transiente Strukturmechanik“ werden die resultierenden thermischen Zugspannungen berechnet. Als Hohlkörper werden die extrudierten Rahmenflächen regelmäßiger Polygone aufsteigend vom Viereck bis zum Zehneck und die extrudierte Rahmenfläche eines Kreises betrachtet. Die geometrischen Körper sind so konstruiert, dass diese innerhalb der Vergleichsgruppe, die von 1/5 bis 4 durchnummeriert ist, immer gleich große Volumina, Stegbreiten und Extrusionshöhen aufweisen, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In der Parametervariation I wird je Hohlkörper bei konstant gehaltener Stegbreite b und Extrusionslänge h das Volumen V durch Verändern der Kantenlänge A variiert und danach bei konstanter Stegbreite b und konstanter Kantenlänge A die Extrusionslänge h verringert (Abbildung 13).

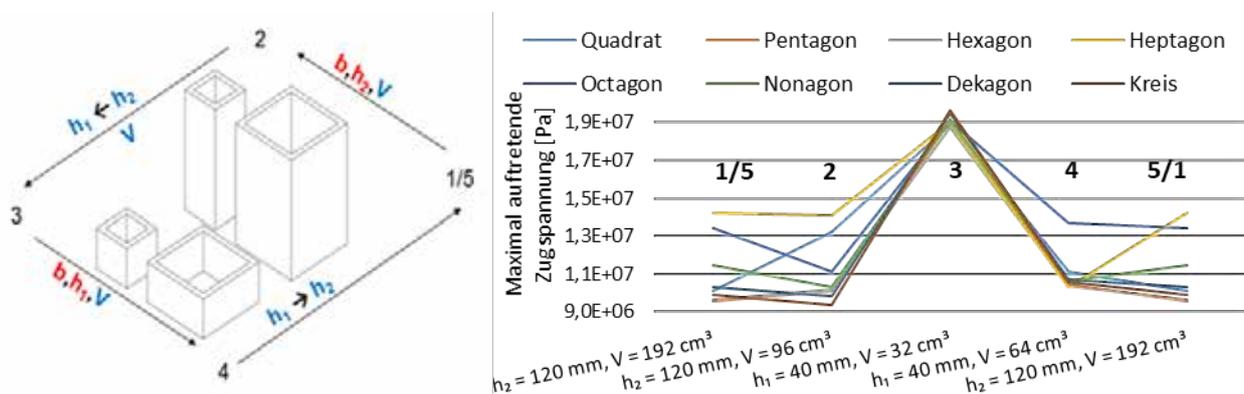


Abbildung 13: Geometrische Parametervariation I über Veränderung der Kantenlänge A und Veränderung der Extrusionslänge h

Bei Parametervariation I zeigt die Variation der Kantenlänge A im Schritt 3 \rightarrow 4 einen deutlichen Einfluss, wohingegen eine Änderung der Kantenlänge bei Schritt 1 \rightarrow 2 nur wenig Auswirkung auf die resultierenden Zugspannungen des Formsteins hat. Die Extrusionslänge h hat bei 2 \rightarrow 3 einen deutlichen Einfluss, zeigt jedoch bei Variation 4 \rightarrow 5 nur eine

geringe Wirkung auf die thermischen Zugspannungen. Bei geringerer Extrusionslänge h ist die Auswirkung der Kantenlänge A stark und entsprechend umgekehrt bei großer Extrusionslänge h schwach ausgeprägt.

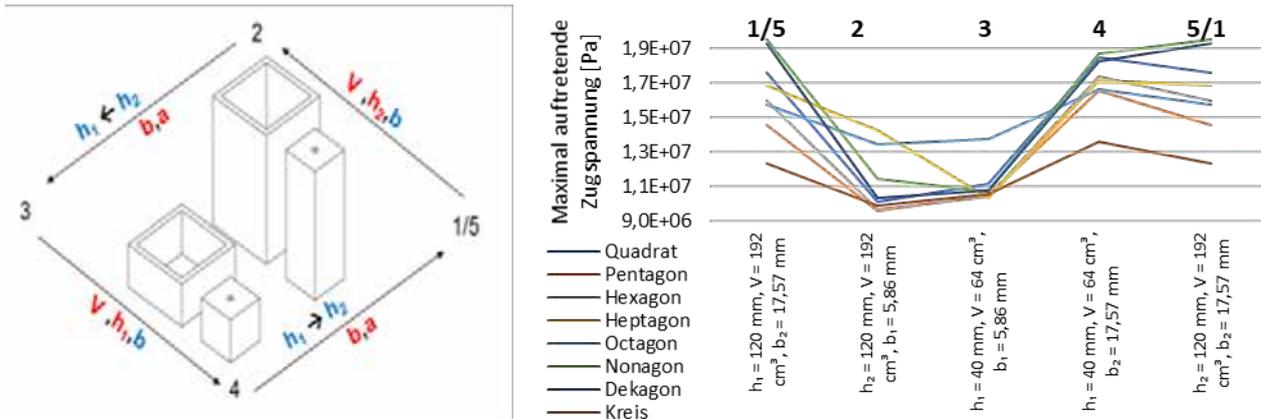


Abbildung 14: Geometrische Parametervariation II über Veränderung der Stegbreite b und Veränderung der Extrusionslänge h

In Parametervariation II wird bei konstantem Volumen V und konstanter Extrusionslänge h die Stegbreite b variiert und dann wie bei der ersten Variation bei konstantem Volumen V und konstanter Stegbreite b die Extrusionslänge h variiert (Abbildung 14). Hier zeigt eine Abnahme der Stegbreite stets eine deutliche Minderung der resultierenden Zugspannungen an. Wie bei der Parametervariation I gilt auch hier bei kleinerer Kantenlänge A eine starke Abhängigkeit der Zugspannungen von der Extrusionslänge h und umgekehrt. D.h. bei der Kombination einer hohen Extrusionslänge h und einer niedrigen Kantenlänge A und bei der Kombination einer niedrigen Extrusionslänge h und einer hohen Kantenlänge A sind die resultierenden thermischen Zugspannungen besonders niedrig.

3.3.3 Simultane thermische Analyse von Ziegel- und Cordierit-Keramik

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten werden keramische Speichermassen aus Ziegel- und Cordieritkeramik hergestellt. Zur Bestimmung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmespeicherkapazität werden bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ rückgetrocknete pulverförmige Proben beider Materialien mittels simultaner thermischer Analyse (STA) verschiedenen, zyklischen Temperaturprofilen zwischen $200 \text{ }^\circ\text{C}/300 \text{ }^\circ\text{C}$, $300 \text{ }^\circ\text{C}/400 \text{ }^\circ\text{C}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}/500 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}/600 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}/700 \text{ }^\circ\text{C}$ und $700 \text{ }^\circ\text{C}/800 \text{ }^\circ\text{C}$ jeweils in einer Atmosphäre aus synthetischer Luft ($80 \text{ Vol.-% N}_2, 20 \text{ Vol.-% O}_2$) unterworfen (Abbildung 15)

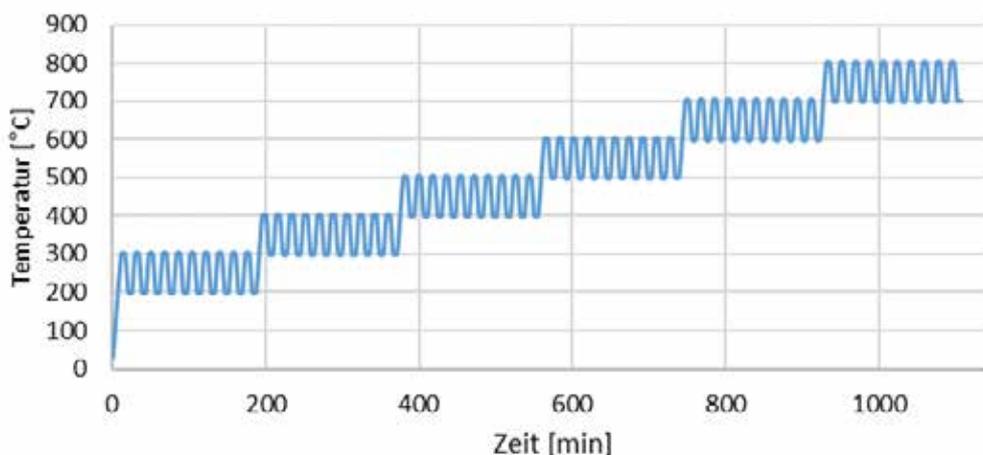


Abbildung 15: Zyklische Temperaturbeanspruchungen im Verlauf von STA-Messungen an Cordierit- und Ziegelpulver

Die ein- und ausspeicherbaren Wärmeenergien gemäß der spezifischen Wärmekapazitäten c beider Keramiksorten steigen jeweils mit der Einsatztemperatur und nähern sich einem Sättigungswert an. Das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Wärmeenergie wird als Effizienz η bezeichnet. Ein möglicher Grund für diesen Verlauf der Messwerte ist das Dulong-Petit-Gesetz, nach dem Feststoffe bei steigender Temperatur einer molaren Wärmekapazität von $3R$, d.h. einem konstanten Wert abhängig von ihrer molekularen Zusammensetzung, zustreben (Abbildung 16).

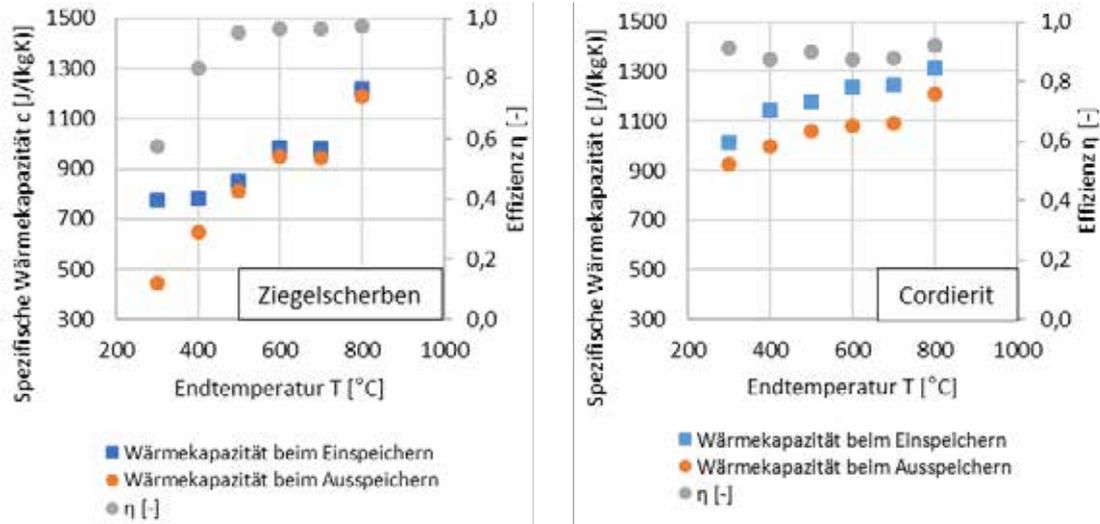


Abbildung 16: Spezifische Wärmekapazität c und Effizienz η von Ziegelkeramik (links) und Cordierit (rechts) in Abhängigkeit von der Endtemperatur

Für die Anwendung als Wärmespeichermasse ist eine hohe Wärmekapazität c wichtig, um eine große Energiedichte bezogen auf das Gewicht zu erreichen. Gleichzeitig sollte die Effizienz η hoch sein, damit ein effektiver Speicherprozess mit geringen Energieverlusten realisierbar ist. Beide Anforderungen werden umso besser erfüllt, je höher die Einsatztemperatur ist. Hier muss in der Anwendung jedoch ein Kompromiss zur Wirtschaftlichkeit gefunden werden, da sich mit steigender Einsatztemperatur die Kosten für die Dämmung, das Containermaterial und die Verrohrungen des Speichers deutlich erhöhen können.

3.3.4 Einfluss der Porengeometrie porosierter Ziegel- und Cordierit-Keramiken auf den Thermoschockparameter 1. Ordnung

Wird ein Material sehr schnell abgeschreckt, z.B. durch schnelles Erhitzen oder Abkühlen, so resultiert eine inhomogene Temperaturverteilung, bei der sich die Oberflächentemperaturen von den Temperaturen des Materialkerns deutlich unterscheiden. Durch diese Temperaturgradienten entstehen temporäre thermische Spannungen. Insofern diese die Festigkeit des Materials nicht überschreiten, führen sie lediglich zu einer elastischen Verformung. Die dabei entstehenden Druck-, Scher- und Zugspannungen bauen sich wieder ab, sobald ein Temperatenausgleich stattfindet. Ein Überschreiten der Festigkeit kann zu Rissen und Abplatzungen und so letztlich zum Materialversagen führen. Der Thermoschockparameter 1. Ordnung beschreibt näherungsweise die Temperaturdifferenz beim Abschreckvorgang. Wird diese Temperaturdifferenz überschritten kann ein Materialversagen die Folge sein. Der Thermoschockparameter 1. Ordnung gilt für unendlich große Wärmeübergänge (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gleichung für die Berechnung des Thermoschockparameters 1. Ordnung sowie die Messgrößen, die zu seiner Berechnung notwendig sind

R_S	$= \sigma_{crit} \times \frac{1 - \nu}{E \times \alpha}$
R_S	Erster Thermoschockparameter [K]
σ_{crit}	Kritische Spannung bzw. Festigkeit [MPa]
E	E – Modul [MPa]
α	Ausdehnungskoeffizient [1/K]
ν	Querkontraktionszahl [-]

Diese idealisierte Modellvorstellung gilt näherungsweise für das Abschrecken heißer Werkstücke bzw. Proben in einem Öl- oder Wasser-Bad. Als kritische Spannung bzw. Festigkeit zur Ermittlung des Thermoschockparameters R_S wird in dieser Arbeit die Biegezugfestigkeit verwendet. Untersucht werden nicht porosierte Nullproben und Proben mit sphärischen,

quaderförmigen und zylindrischen Poren aus Ziegel- und Cordierit-Keramik. Dazu werden vor der Extrusion der Formkörper den jeweiligen pressfeuchten Massen 20 Vol.-% geeigneter, organischer Porosierungsmittel hinzugefügt, die sich beim Aufheizprozess thermisch zersetzen und dabei Poren mit entsprechender Geometrie hinterlassen. Alle hier erzeugten Poren-Geometrien verfügen im Mittel über ein Einzelvolumen von ca. 8 mm³ und unterscheiden sich nur durch ihre Form (Abbildung 17).



Abbildung 17: Fertig gesinterte, porosierte Laborziegel mit sphärischen (Links), quaderförmigen (Mitte) und zylindrischen (Rechts) Poren und jeweils zugehörige Porosierungsmittel

Zur Berechnung des Thermoschockparameters 1. Ordnung werden je Ziegelsorte zunächst die werkstofftechnischen Kenngrößen E-Modul, Querkontraktionszahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient und die Biegezugfestigkeit gemessen. (Tabelle 7).

Tabelle 7: Berechnete Thermoschockparameter 1. Ordnung R_s für die unporosierten Nullproben sowie die Proben aus porosierter Cordierit- und Ziegel-Keramik

Art der Keramik/ Probenreihe	Cordierit R_s [K]	Ziegel R_s [K]
Nullprobe (unporosiert)	526,09	207,14
Sphärische Poren	455,46	210,05
Quaderförmige Poren	411,76	136,46
Zylindrische Poren	424,31	445,86

Aus der Untersuchung geht hervor, dass die unporosierten und porosierten Cordierit-Proben im Vergleich mit den entsprechenden Ziegelproben deutlich höhere Thermoschockparameter 1. Ordnung aufweisen. Einzig die Ziegelporosierung mit zylindrischen Poren führt zu einem, gegenüber der Ziegel-Nullprobe und der Cordierit-Probe mit zylindrischen Poren, höheren Thermoschockparameter 1. Ordnung. Bei der Cordierit-Keramik gelingt eine Erhöhung des Thermoschockparameters durch Integration unterschiedlicher Porengeometrien in keinem Fall. Durch die Porosierung mit zylindrischen Poren kann das deutlich preisgünstigere Material „Ziegelkeramik“ im Bereich der Thermoschockbeständigkeit mit dem im Vergleich teureren Cordierit mithalten bzw. diesen Werkstoff sogar leicht übertreffen. Das angestrebte Ziel der Messreihe, die Werte des Thermoschockparameters 1. Ordnung durch Zuschlagstoffe so gut wie möglich zu erhöhen, wird in der Kombination Ziegel mit zylinderförmigen Poren sehr deutlich erreicht.

3.3.5 Prüfstand für thermische Speichermassen

In einem eigens entwickelten Prüfstand (Abbildung 18) können innerhalb eines Druckbehälters verschiedene Speichermassen, z.B. Prüfkörper aus Ziegel- und Cordierit-Keramik eingesetzt und zyklischen Abschreckversuchen unterworfen werden, mit dem Ziel, ihre Eignung für die thermische Energiespeicherung zu untersuchen. Als Probekörper werden kommerziell erhältliche Planziegel mit den Abmessungen 248 x 370 x 249 mm verwendet. Dabei wird jeweils ein einzelner Ziegel mittels elektrischer Strahlungsheizung auf bis zu 750 °C erhitzt und nach einer definierten Haltezeit von einer regelbaren Düse mit fein zerstäubtem VE-Wasser besprüht. Dabei erfolgt eine schlagartige Abschreckung der Ziegel und gleichzeitig eine Direktdampferzeugung bei einem Druck von maximal 2 bar. Der bei diesem Auslassdruck über ein

Dampfventil austretende Wasserdampf wird in einem Wasserbecken auskondensiert. In den hier gezeigten Versuchen werden massive Hochlochziegel auf die Temperaturen 450 °C, 500 °C und 550 °C erhitzt und jeweils mit einem VE-Wasser-Volumenstrom von 25 l/h auf eine 200 K niedrigere Temperatur abgeschreckt. Es werden die gemittelten Ergebnisse der jeweils ausgespeicherten und eingespeicherten Energien sowie die sich daraus ergebenden Effizienzen in Relation zu der jeweilig vorherrschenden Endtemperatur aufgetragen (Abbildung 19).



Abbildung 18: Prüfstand für zyklische Abschreckversuche an handelsüblichen Ziegelproben

Aus den durchgeführten Versuchen geht hervor, dass sich die Wärmespeicherkapazität mit steigenden Temperaturen erhöht. Ebenso erhöht sich das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Energie mit der Temperatur. Die Folge ist ein deutlicher Anstieg der Effizienz mit dem Erhöhen der Temperatur.

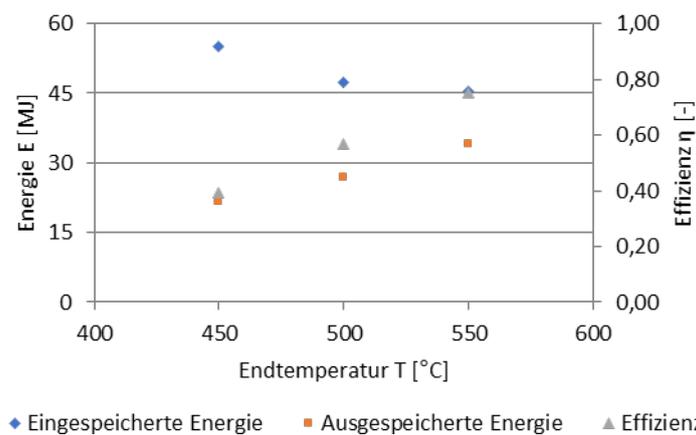


Abbildung 19: Mittelwerte der aus- und eingespeicherten Wärmeenergien und die damit berechneten Effizienz-Werte in Abhängigkeit von der Endtemperatur

3.3.6 Zukünftige Tätigkeiten im Teilprojekt

Neben den bereits simulierten einfachen Hohlgeometrien der Speichermassen sollen künftig Lochbilder mit einer Vielzahl unterschiedlich geformter Hochlöcher hinsichtlich der entstehenden thermisch induzierten Spannungen bei schlagartigen Temperaturwechseln mittels der FEM-Methodik untersucht werden. Auch soll der Druckverlust beim Durchströmen dieser Hohlgeometrien mittels einer fluiddynamischen FEM-Simulation berechnet werden. Mit den so gewonnenen Daten wird eine geometrische Optimierung vorgenommen, um ein Konzept für einen Direktdampfzeuger mit einer Speicherkapazität von ca. 10 MWh zu entwickeln, der in einem Dampfkraftwerk wechselweise zum Vorwärmen des Speisewassers oder zum Einleiten von Sattdampf in eine Fernwärmeleitung dienen soll.

Seit Jahresende werden unterschiedlich porosierte keramische Vollkörper im neuen Abschreck-Prüfstand auf ihre Zyklenstabilität geprüft (Abbildung 20).



Abbildung 20: Untersuchung von Cordierit-Vollkörpern im neuen Abschreck-Prüfstand

Außerdem erfolgen Untersuchungen zur Extrusion von Hohlprofil-Speichermassen. Die dabei verwendeten Extruder-Mundstücke werden durch Rapid Prototyping aus Polymilchsäure hergestellt. Nach dem Trocknen und Sintern der so hergestellten keramischen Hohlprofile, können diese im weiteren Verlauf auf ihre Zyklenstabilität geprüft werden. Für die werkstofftechnische Optimierung der Speicherkeramiken wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit durch gezielte Zugaben von Graphit, Bornitrid und Siliziumcarbid zu den Extrusionsmassen abgeschlossen und sind derzeit in der Phase der Auswertung.

4 Dynamisches Verhalten von Power-to-Gas und Power-to-Liquid Synthesen (SP3)

4.1 Reaktorkonzept für dynamische Methanisierung

Michael Neubert, Jürgen Karl (EVT)

Das vorgestellte additive Methanisierungskonzept ADDmeth aus dem letzten Jahresbericht 2019 wurde im Laufe des Jahres 2020 als 5 kW Prototyp realisiert (siehe Abbildung 21). Dies geschah allerdings nicht im Forschungsvorhaben des Energie Campus Nürnberg, sondern im Zuge eines anderen Förderprojekts (Projekt: i³upgrade; RFCS Contract Nr.: 800659).



Abbildung 21: Fotografische Darstellung der Entwicklungsschritte des Heatpipe-gekühlten Methanisierungsreaktors ADDmeth; im Vordergrund ist der 5 kW Laborprototyp aus 1.4404 Edelstahl abgebildet

Die additive Fertigung ermöglicht eine freie Gestaltung der Reaktorgeometrie und erschließt somit ein hohes Potential für die Optimierung der Methanisierung. Auf der einen Seite könnte durch angepasste Wandstärken an Material eingespart und somit die hohen spezifischen Materialkosten gesenkt werden. Darüber hinaus kann anhand von Untersuchungen zum Reaktionsverlauf die Geometrie des Reaktionskanals angepasst werden, was den Umsatz bzw. die Produktausbeute erheblich erhöhen könnte.

Neben diesen Vorteilen gehen mit dem additiven Modell allerdings auch ein paar Nachteile mit einem höheren Risiko für den Betrieb einher. Einerseits sind – nach heutigem Stand – die Kosten für die Druckstandzeit der additiven Fertigung relativ hoch. Des Weiteren müssen bei einem solch hochinnovativen Reaktorkonzept noch tiefere wissenschaftlichen Fragestellungen beantwortet werden, die nicht nur die Optimierung der Reaktorgeometrie umfassen, sondern auch und insbesondere die Materialfestigkeit. Letztere muss für Prozesstemperaturen bis 550°C und -drücke bis 10 bar erst noch eingehend überprüft werden, vor allem im dynamischen Betrieb. Dieser tiefere Forschungsbedarf steht den im Rahmen des Energie Campus Nürnberg geforderten Bestrebungen einer zügigen Anwendungsdemonstration in einer hochskalierten Anlage entgegen.

Aus diesem Grund wurde im Jahr 2020 das Reaktorkonzept verfolgt, welches ursprünglich im Förderantrag beschrieben wurde. Dieses Konzept stellt einen polytropen Reaktor mit Festbettkühlung, bei dem die Heatpipes zur Wärmeabfuhr direkt in die Schüttung eingebettet sind. Es kombiniert konventionelle Massenware und Normteile - wie Rohre und Flansche - und kann mit einfachen spanenden Fertigungsverfahren und Schweißverfahren gefertigt werden. Zum heutigen Zeitpunkt sind dadurch deutlich geringere spezifische Investitionskosten darstellbar, bei gleichzeitig geringerem Risiko für die Inbetriebnahme und den Einsatz. Denn im Gegensatz zum additiven Modell können hier auf etablierte Verfahren und empirische Korrelationen zur Berechnung der Materialfestigkeit, des Druckverlusts und dem Wärmetransport zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund wurde im Energie Campus Nürnberg die Auslegung, Konstruktion und Fertigung dieses 20 kW Reaktorkonzepts durchgeführt. (siehe Abbildung 22).

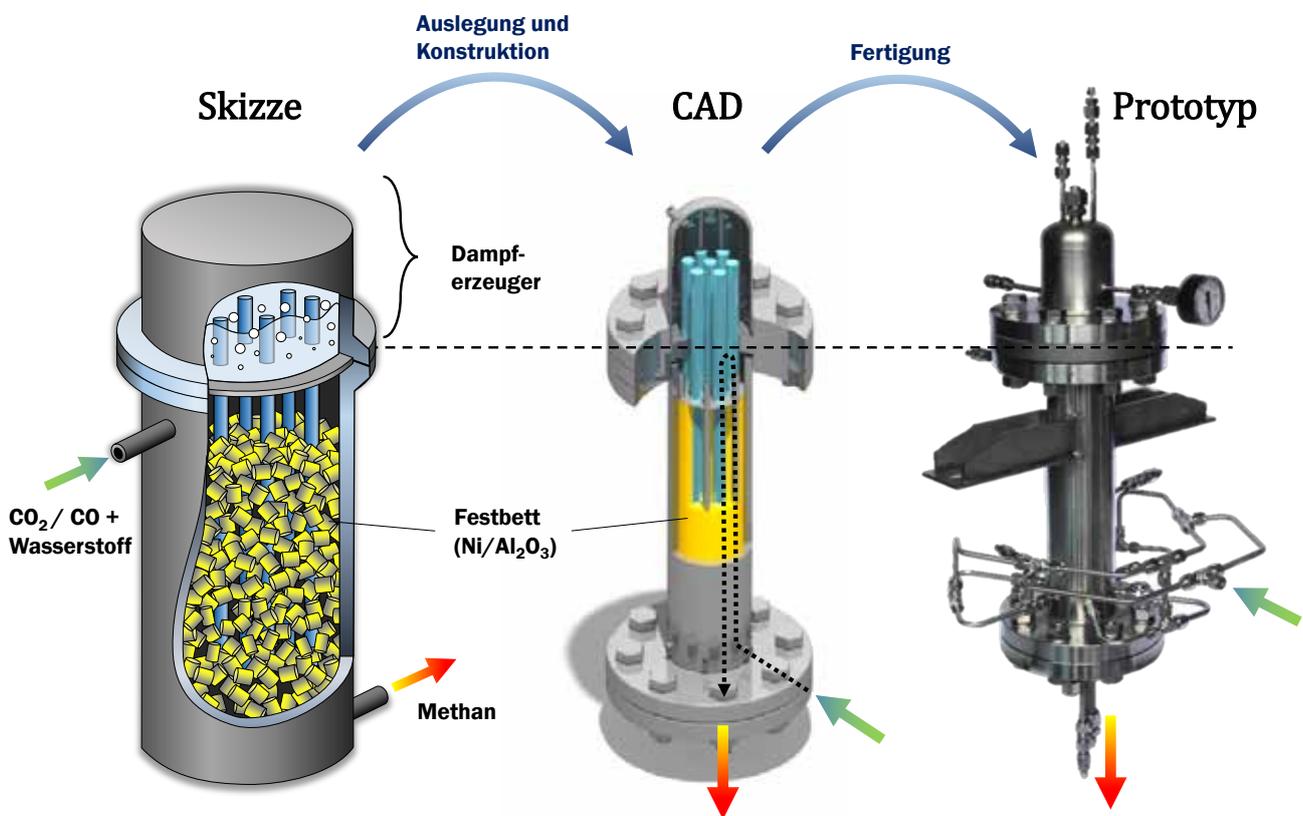


Abbildung 22: Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines 20kW Methanisierungsreaktors mit Heatpipe-Kühlung des Festbetts und Dampferzeugung (CAD: Computer Aided Design)

Dieser Methanisierungsreaktor setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Dem eigentlichen Reaktorkörper mit Festbetschüttung im unteren und einem Dampferzeuger im oberen Bereich. Der Reaktorkörper wurde im Rahmen des Energie Campus Nürnberg ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Der Dampferzeuger wurde hingegen in einem anderen Förderprojekt (BMWi-Projekt: Power-to-Biogas; Förderkennzeichen: 03KB165A) entworfen und montiert. Verbunden sind beide Teile über die Heatpipes, die eine Wärmeübertragung aus dem Festbett hin zum Dampferzeuger ermöglichen. Die Wärme der exothermen Methanisierung kann somit aus dem Festbett abgeführt und zur Erzeugung von Prozessdampf genutzt werden.

Für die Fertigung der Heatpipes wurden Präzisions-Edelstahlrohre mit einem Blindflansch stoffschlüssig verbunden (siehe Abbildung 23a), diese Verbindung wurde über Vakuumlöten im Hochtemperaturofen durchgeführt. Für die Befüllung der Heatpipes wurde ein Edelstahl-Mesh eingezogen, die Rohre einseitig verschlossen, ein Vakuum angesetzt und Wasser eingeführt. Im Anschluss daran wurden die Böden der Heatpipes angeschweißt und diese somit gasdicht verschlossen. Die Böden der Heatpipes und das Gitter, welches die Festbetspartikel im Reaktor trägt, sind in Abbildung 23b dargestellt. Abbildung 23c zeigt weitergehend einen Ausschnitt aus dem R&I-Fließbild des gesamten Prozesses, der als zweistufige Methanisierung mit Zwischenkondensation ausgelegt wurde (siehe Abbildung 23d). Die zweite Stufe bildet hierbei ein einfacher Festbettreaktor, da hier ein geringerer Reaktionsumsatz und -wärmeeintrag zu erwarten sind. Der Prototyp des 20 kW Heatpipe-Reaktors wurde im Jahr 2020 fertig gestellt, für 2021 sind nun der Aufbau der kompletten zweistufigen Anlage mit Zwischenkondensation und die Inbetriebnahme geplant. Darüber hinaus sollen in einer ersten Versuchskampagne die Leistung und Effektivität dieses einzigartigen Reaktorsystems überprüft werden.

Nach Abschluss des Energie Campus Nürnberg ist eine Fortführung der Entwicklung im Rahmen weiterer Drittmittelprojekte angedacht. Hierbei soll das System in industriell, relevanten Einsatzumgebungen erprobt („Feldtest“) und in eine Technologie mit hohem technologischem Reifegrad überführt werden.

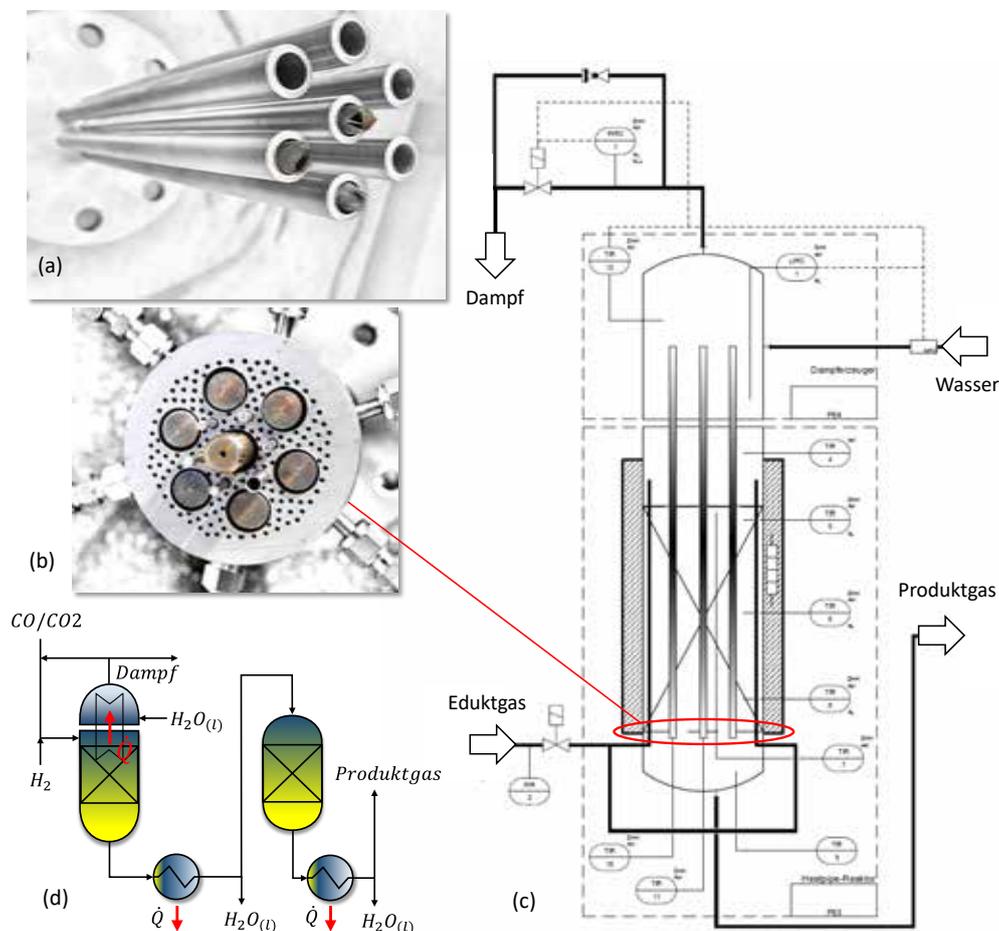
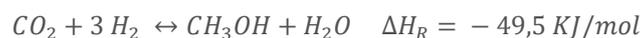


Abbildung 23: Mit Blindflansch verbundene Heatpipes vor der Befüllung (a), Heatpipe-Boden nach der Befüllung mit Gitter (b), Ausschnitt aus dem R&I-Fließbild zum 20kW Methanisierungsreaktor (c) und Prozessschema der zweistufigen Methanisierung mit Zwischenkondensation (d)

4.2 Katalysatorentwicklung für die instationäre Methanolsynthese

Patrick Schühle, Peter Wasserscheid, Jakob Albert (CRT)

Die Erzeugung erneuerbarer Energie durch Photovoltaik oder Windkraft findet vielfach in dezentralen Einheiten statt und unterliegt natürlichen Schwankungen in der Verfügbarkeit der Primärenergieträger. Um Erzeugung und Verbrauch sowohl zeitlich als auch örtlich miteinander zu synchronisieren sind neue Speicher- und Transporttechnologien nötig. Die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse und dessen weitere Umsetzung zu flüssigen Energieträgern gilt als vielversprechende Technologie. Methanol weist als Energieträger dieser Art zahlreiche Vorteile, wie eine hohe volumetrische Energiedichte ($4,4 \text{ kWh l}^{-1}$) sowie eine flexible Nutzbarkeit (z.B. Energiespeicher, Treibstoffzusatz, Grundchemikalie) auf. In einem klimaschonenden Szenario der Methanolsynthese wird erneuerbarer Wasserstoff mit CO_2 aus der Atmosphäre oder aus industriellen Abgasen, in einer exothermen Reaktion umgesetzt:



Da die industrielle Methanolsynthese einerseits durch die Umsetzung von Kohlenstoffmonoxid und andererseits unter stationären Bedingungen erfolgt, ist für das ressourcenschonende Verfahren eine Anpassung von Katalysator- und Reaktorkonzepten nötig.

Ein bisher wenig erforschtes, aber vielversprechendes Katalysatorsystem stellen geträgerte In_2O_3 -Materialien dar. Im Rahmen dieses Projektteils wurden vielfältige Aspekte zum Einsatz In_2O_3 -basierter Katalysatoren für die grüne Methanolsynthese untersucht. Zwei bereits in den Vorjahren in Betrieb genommene reaktionstechnische Anlagen wurden zu diesen Untersuchungen eingesetzt. In einem klassischen Festbettreaktor konnten im vergangenen Jahr Studien zum Einfluss von Prozessgasverunreinigungen auf die katalytische Performance von $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysatoren abgeschlossen werden. Eine schematische Zusammenfassung dieser Arbeiten gibt Abbildung . Im Detail wurden die Katalysatoren mit potentiellen Verunreinigungen von CO_2 -Quellen (H_2S , SO_2 , NH_3 , NO_2 und kurzkettige Kohlenwasserstoffe) in Kontakt gebracht um anschließend deren Einfluss auf die katalytische Performance und die morphologische und chemische Änderung der Katalysatoren zu untersuchen.

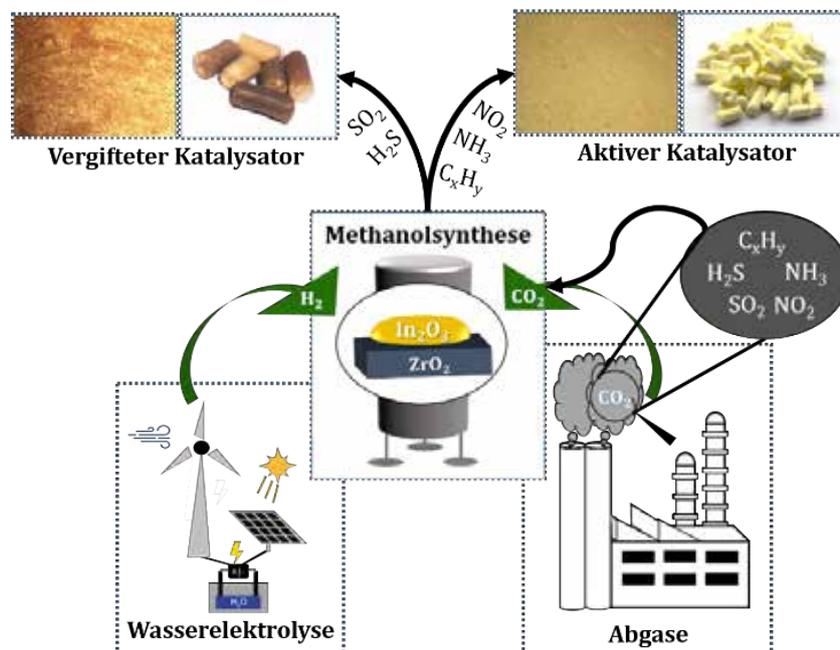


Abbildung 24: Grafische Zusammenfassung der Studien zum Einfluss von Prozessgasverunreinigungen auf die Performance des $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysators im Festbettreaktor.

Es konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere schwefelhaltige Komponenten wie H_2S und SO_2 zur Deaktivierung des Katalysators führen, was die Entfernung dieser Verunreinigungen aus CO_2 -haltigen Abgasen vor dem Einsatz in der Methanolsynthese erforderlich macht. Durch den Einsatz vielfältiger analytischer Methoden (z.B. Röntgenphotoelektronenspektroskopie, temperaturprogrammierte Desorption und Reduktion) konnte aufgeklärt werden, dass eine irreversible Bildung von Sulfiden und Sulfaten zur Verringerung der CO_2 -Bindungsfähigkeit und zur Vergiftung aktiver

In₂O₃-Zentren führt. Gegenüber den untersuchten stickstoffhaltigen Gasen sowie kurzkettigen (< C₅) Kohlenwasserstoffen war das neuartige Katalysatorsystem stabil. Eine umfassende Diskussion der in Kooperation mit der Technischen Universität Dänemark entstandenen Ergebnisse kann der zugehörigen Veröffentlichung aus dem Jahr 2020 entnommen werden [1].

Ein weiterer Projektstrang des vergangenen Jahres befasste sich mit dem Einsatz In₂O₃-basierter Katalysatoren in einem Slurry-Reaktorkonzept. In diesem Verfahren befindet sich der geträgerte, heterogene Katalysator suspendiert in einer thermostabilen Trägerflüssigkeit. Die Flüssigkeit ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung und eine verbesserte Speicherung der Prozesswärme, was insbesondere für eine dynamische Betriebsweise mit transientscher Wärmeproduktion vorteilhaft ist. Erstmals konnte gezeigt werden, dass das In₂O₃-basierte Katalysatorsystem zur Methanolproduktion im Slurry-Konzept eingesetzt werden kann, ohne nach fünffachem Recycling zu deaktivieren. Der Einfluss von Trägerflüssigkeit und Prozessbedingungen (z.B. Druck, Temperatur, Gaszusammensetzung) auf die Methanolproduktivität und -selektivität wurde untersucht und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung umfassend diskutiert [2].

Ein drittes Arbeitspaket des vergangenen Jahres umfasste den erstmaligen Einsatz von geträgerten In₂O₃-Nanopartikeln als heterogene Katalysatoren, welche über das Verfahren der „gepulsten Laserablation in Flüssigkeiten“ hergestellt wurden. Herstellung und teilweise Charakterisierung der Materialien erfolgte am Lehrstuhl für Technische Chemie I, der Universität Duisburg-Essen. Die reaktionstechnische Untersuchung dieser neuen Katalysatoren erfolgte an der FAU am Beispiel der Methanolsynthese im Slurry-Reaktorkonzept. Das Verfahren der Laserablation, welches sich durch Vorteile wie eine einfache Skalierbarkeit und eine hohe Reinheit der Materialien auszeichnet, ermöglichte die Synthese von geträgertem In₂O₃ mit konkurrenzfähiger katalytischer Aktivität.

4.3 Dynamische Simulation und Optimierung des Reaktorkonzepts

Konrad Fischer, Hannsjörg Freund (CRT)

Die Arbeiten in diesem Teilvorhaben wurden bereits planmäßig im Vorjahr abgeschlossen.

5 Schlussworte

In den zurückliegenden Jahren konnten erfreulicherweise viele Anknüpfungspunkte zu den Aktivitäten im Projekt Speicher A geschaffen werden. So konnten bereits mehrere Drittmittelprojekte im Kontext zu dem Reaktordesign im Teilprojekt 3 („Dynamisches Verhalten von Power-to-Gas und Power-to-Liquid Synthesen“) eingeworben werden, bei denen das vorgeschlagene Design zu gekühlten Synthesereaktoren in einem weiten Bereich zum Gegenstand weiterer Forschung und Entwicklung wurde. Hier wurde die große Bandbreite an verschiedenen Anwendungen (z.B. Methanisierung von Stahlwerksgasen im vom Lehrstuhl Energieverfahrenstechnik koordinierten EU-Projekt „i3upgrade“, strommarktdienliche Direktmethanisierung in Biogas-/Biomethananlagen in den Projekten „Power-to-Biogas“ und FlexBioMethane) genutzt, um vor allem mit dem 3D-Druck auch bezüglich der Fertigungstechnologie neue Wege einzuschlagen.

Im Jahr 2021 gilt es nun, den Abschluss der experimentellen Arbeiten voranzutreiben und die Arbeitshypothesen auch mit dem Proof-of-Concept an den großen Versuchsanlagen erfolgreich zu belegen und anschließend mit der Entwicklung und Vorbereitung von Projektanträgen hinsichtlich Demonstrationsvorhaben auch den Schritt zum großtechnischen Einsatz der Technologien durch das EnCN-Konsortium zu begleiten.

6 Vorträge & Poster 2020

- [1] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Energy storage by CO₂-hydrogenation to methanol using In₂O₃-catalysts in fixed-bed and slurry reactors. Hydrogen Dialogue, 2020
- [2] P. Schühle, S. Reichenberger, G. Marzun, J. Albert. Chemical energy storage via Power-to-Liquid: Using slurry phase hydrogenation of CO₂ to methanol. ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2020
- [3] P. Schühle, M. Schmidt, L. Schill, A. Riisager, P. Wasserscheid, J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of CO₂ to methanol using Indium-based catalysts. ProcessNet-Jahrestagung, 2020

7 Veröffentlichungen 2020

- [1] B. Eppinger; L. Zigan; J. Karl; S. Will. Pumped thermal energy storage with heat pump-ORC-systems: Comparison of latent and sensible thermal storages for various fluids. Applied Energy, 280, 115940, 2020
- [2] D. Steger, C. Regensburger, B. Eppinger, S. Will, J. Karl, E. Schlücker. Design aspects of a reversible heat pump - Organic rankine cycle pilot plant for energy storage. Energy, Volume 208, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118216>
- [3] P. Schühle; M. Schmidt; L. Schill; A. Riisager; P. Wasserscheid; J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of CO₂ to methanol using Indium-based catalysts. Catalysis Science & Technology 10, 2020
- [4] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Application of In₂O₃-catalysts for slurry phase hydrogenation of CO₂ to methanol: Influence of reaction conditions and catalyst support, Chemie Ingenieur Technik 93, 2020

8 Literaturverzeichnis

- [1] P. Schühle; M. Schmidt; L. Schill; A. Riisager; P. Wasserscheid; J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of CO₂ to methanol using Indium-based catalysts. Catalysis Science & Technology 10, 2020 (A)
- [2] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Application of In₂O₃-catalysts for slurry phase hydrogenation of CO₂ to methanol: Influence of reaction conditions and catalyst support, Chemie Ingenieur Technik 93, 2020 (B)

SPEICHER B

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU - LS für technische Thermodynamik – Prof. Dr. Michael Wensing; FAU - LS für technische Thermodynamik – Prof. Dr. Stefan Will FAU - LS für chemische Reaktionstechnik – Prof. Dr. Peter Wasserscheid FAU - LS für Prozessmaschinen und Apparatechnik – Prof. Dr. E. Schlücker FAU - LS für Thermische Verfahrenstechnik – Prof. Dr. Wolfgang Arlt FAU - Erlangen Catalysis Resource Center – Prof. Dr. Martin Hartmann FAU - LS für Volkswirtschaftslehre – Prof. Dr. Veronika Grimm FAU - LS für Volkswirtschaftslehre – Prof. Dr. Gregor Zöttl	TPJ1: Effiziente Wasserstoffspeicherung TPJ2: Effiziente Wasserstofflogistik TPJ3: Effiziente Wasserstoffnutzung

Projektbericht 2020

Ziel des Projektes Speicher B ist es, bis 2022 marktreife LOHC-Technologien zu entwickeln. Dabei werden drei wesentliche Bestandteile betrachtet: Neben der Weiterentwicklung der Speichertechnologie für stationäre Anwendungen und der Entwicklung und Optimierung wesentlicher Aspekte für die Nutzung der Technologie in der Wasserstofflogistik, soll die Kopplung der LOHC-Technologie mit anderen Technologien die Bandbreite und die generelle Anwendbarkeit von LOHC-Anlagen demonstrieren. Im Rahmen des Projektes Speicher B wird so z.B. die Verschaltung von BHKWs mit dem LOHC-Prozess untersucht.

Der Energie Campus und der Standort Nürnberg bieten für diese Vorhaben ein optimales Umfeld. Durch die am EnCN beteiligten Lehrstühle für Chemische Reaktionstechnik, Prozessmaschinen und Anlagentechnik und Technische Thermodynamik, kann die technische Entwicklung von LOHC-Reaktionssystemen in allen relevanten Aspekten abgebildet werden.

Neben den bereits bestehenden Kontakten zum Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (HI-ERN) bestehen seit 2019 über Frau Prof. Dr. Grimm und Herrn Prof. Dr. Wasserscheid ebenfalls direkte Ansprechpartner im neu gegründeten Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). Die dem H2.B zugedachte Rolle als Plattform für Wissenschaft, Industrie und Politik bietet auch dem Projekt Speicher B zukünftig die Möglichkeit, Kontakte zur bayerischen Wasserstoffindustrie zu knüpfen und zu vertiefen.

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

1 Teilprojekt: Effiziente Wasserstoffspeicherung

1.1 Optimierung der Reaktionsprozesse

Um die freiwerdende Reaktionswärme der Hydrierung von LOHC für die Dehydrierung nutzbar zu machen, muss die Hydrierung entgegen seiner thermodynamischen Präferenz bei höheren Temperaturen erfolgen als die Dehydrierung. Mit vorausgegangenen Versuchen konnten bereits Reaktionssysteme identifiziert werden, die für die Hochtemperaturhydrierung geeignet sind. Die Forschung am EnCN setzt nun bei der Erprobung des oneReactor-Konzepts im Pilot-Maßstab an. Dabei sollen die Hydrierung und Dehydrierung abwechselnd im selben Reaktor unter Verwendung desselben Katalysators erfolgen.

Zur Untersuchung des oneReactor-Konzepts wurde die miniOne-Anlage im Speicherhaus untergebracht. Bei dem Herzstück der Anlage handelt es sich um einen vertikalen Rohrbündelreaktor. Die Reaktionszone besteht aus vier parallelen, mit Katalysatorpellets gefüllten Rohren, deren Mantel durch Umströmung eines Wärmeträgeröls beheizt wird. Der Kopf und Sumpf des Reaktors sowie die Zuleitungen von Flüssig- und Gasphase werden durch elektrische Heizungen temperiert. Je nach Betriebsmodus werden nicht nur unterschiedliche Druckniveaus und Temperaturen gewählt, sondern auch die Flussrichtung des LOHCs angepasst. Demnach wird bei der Dehydrierung das flüssige LOHC von unten über den Reaktorsumpf zudosiert (Upflow-Betrieb). Das gesamte Katalysatorbett ist dabei mit der Flüssigphase geflutet und eine Trennung von Gas- und Flüssigphase erfolgt oberhalb der Katalysatorschüttung. Im Gegensatz dazu findet die Hydrierung in Form eines Rieselbetts statt (Downflow-Betrieb). Die Dosierung des LOHCs erfolgt hierbei von oben auf die in der Gasphase befindliche Katalysatorschüttung. Unterhalb des Katalysatorbetts wird die hydrierte Flüssigphase im Sumpf des Reaktors abgeschieden, wo sie anschließend aus dem Reaktor ausgespeist wird.

Während des Betriebs werden die Durchflussmengen des zugeführten, bzw. ausgeschleusten LOHCs aufgezeichnet. Ebenso kann durch Massendurchflussmessungen die Gasmenge erfasst werden, die bei der Dehydrierung frei wird, bzw. die bei der Hydrierung nachdosiert werden muss, um den Druck im Reaktor aufrecht zu erhalten. Entnahmestellen für Flüssigproben vor und nach dem Reaktor ermöglichen externe Analysen hinsichtlich Hydrier- bzw. Dehydriergrad des LOHCs und zur Nebenproduktbildung. Somit ist es möglich, über die im Träger eingespeicherte Wasserstoffmenge zu bilanzieren und verschiedene Betriebspunkte miteinander zu vergleichen.

Die Inbetriebnahme des miniOne erfolgte vor Ort unter Verwendung des LOHC-Systems Dibenzyltoluol/Perhydrodibenzyltoluol. Es wurden erste Versuche im Dehydrierbetrieb bei unterschiedlichen Temperaturen (270-310 °C) und Drücken (2-5 bar_a), sowie verschiedenen LOHC Mengen durchgeführt. Die erzielte Wasserstofffreisetzung und der entsprechende Dehydriergrad konnten für einige Betriebspunkte erfolgreich reproduziert werden. Analog dazu soll eine Versuchsreihe der Hydrierung (280-300 °C und 20-30 bar_a) erfolgen. Darüber hinaus soll das Umschaltverhalten zwischen Hydrierung und Dehydrierung untersucht und auch die Zyklenstabilität des Katalysators und des LOHCs untersucht werden.

Eine umfassende Charakterisierung der Anlage und die Erstellung eines Kennfelds ist für das LOHC-System Benzyltoluol/Perhydrobenzyltoluol geplant. Dieser Träger verspricht, bei gleichbleibendem Druckniveau, während der Dehydrierung schon bei niedrigeren Temperaturen Wasserstoff freizusetzen. Die Temperaturniveaus der Hydrierung und Dehydrierung nähern sich so deutlich an, so dass die Wärmeintegration der beiden Teilprozesse verbessert wird. Für die Effizienzsteigerung sind hierbei auch kleine Temperaturänderungen von großer Bedeutung. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage wird durch die Durchführung von Langzeit- und Zyklenversuchen bei verschiedenen Betriebsparametern (z.B. Druck, Temperatur, LOHC-Fördermenge, eingehende Hydriergrade) möglich.

1.2 Anlage zur automatisierten und standardisierten Katalysatorcharakterisierung

Die unabhängige Bewertung verschiedener Katalysatorsysteme ist ein entscheidender Baustein der Katalysatorentwicklung. Aus diesem Grund wurde eine Laboranlage entwickelt, an der bei höchstmöglichem Automatisierungsgrad standardisierte Dehydrierungsversuche durchgeführt werden können. Somit kann die Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit verschiedener Katalysatorsysteme bestimmt werden.

Da die Kinetik einer chemischen Reaktion exponentiell von der Temperatur abhängt, liegt ein besonderer Fokus des Messaufbaus auf der Temperierung des Reaktionssystems. Der Dehydrierreaktor wurde mit Teilen der Reaktorperipherie in einen Heißluftofen eingebracht. Dies ermöglicht das voll-automatisierte Anfahren verschiedener Temperaturen. Die definierte Zufuhr von frischem, mit Wasserstoff beladenem LOHC in den Reaktionsraum erfolgt über eine Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC)-Pumpe. Die entsprechende Wasserstofffreisetzungsrate wird mit Hilfe eines geeigneten Massendurchflussmessers (MFM) bestimmt. Zusätzlich ist dem Reaktor ein Druckhalteventil nachgeschaltet, um den Einfluss des Systemdrucks auf die Reaktion zu untersuchen (vgl. Abbildung 2).

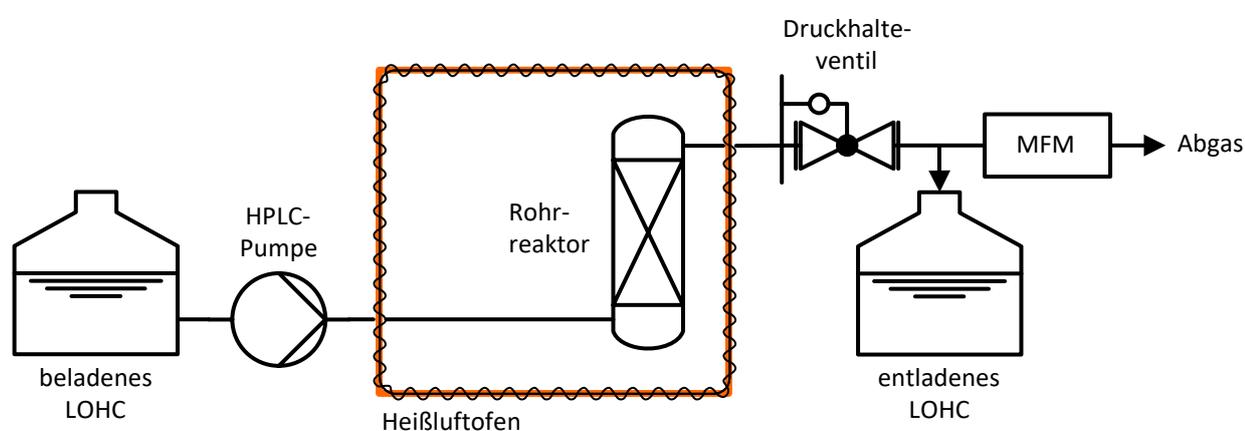


Abbildung 1: Vereinfachtes Fließbild der Laboranlage

Als Reaktor wird ein Rohrreaktor aus Edelstahl verwendet, der nach dem *Single-Pellet-String*-Prinzip betrieben wird. Der Katalysator wird hier nicht als Festbett, sondern als einzelne Reihe von Pellets eingesetzt. Die Pellets haben annähernd die gleiche Größe wie der Rohrrinnendurchmesser und können somit im Rohr übereinandergestapelt werden. Dieser Reaktortyp eignet sich sehr gut zur Untersuchung von industriell angewendeten Katalysatoren. Die erreichbaren Fluidgeschwindigkeiten ähneln stark denen in industriellen Anlagen. Durch die Strömung von alternierenden Gas- und Flüssigkeitsblasen (*Taylor Flow*) kann ein sehr guter Stoff- und Wärmetransport gewährleistet werden. Außerdem herrschen für alle Katalysatorpartikel ähnliche Bedingungen, da es im Vergleich zum Festbett keinen Unterschied zwischen Partikeln gibt, die nahe oder weit entfernt von der Reaktorwand liegen.^{1,2}

¹ S. Haase, M. Weiss, R. Langsch, T. Bauer und R. Lange, Hydrodynamics and mass transfer in three-phase composite minichannel fixed-bed reactors, *Chemical Engineering Science*, 94, 224-236, 2013.

² A. I. Hipolito, M. Rolland, C. Boyer und C. de Bellefon, Single Pellet String Reactor for Intensification of Catalyst Testing in Gas/Liquid/Solid Configuration, *Oil Gas Science and Technology - Rev. IFP Energies nouvelles*, 65(5), 689-701, 2010.

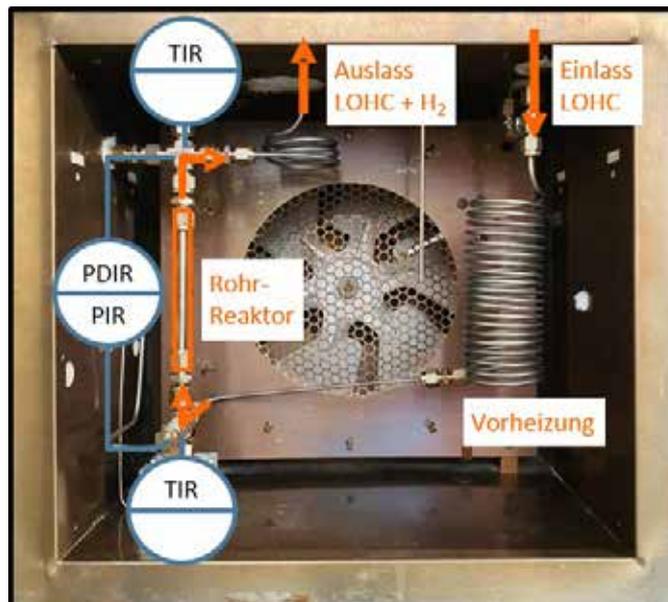


Abbildung 2: Reaktor und Peripherie im Ofenraum der Laboranlage

Zu Beginn des Jahres wurde die Reaktorperipherie im Ofenraum (Abbildung 2) angepasst, um im Betrieb Temperaturunterschiede zwischen den Messstellen (TIR) am Reaktoreinlass und -auslass zu verringern. Hiervon unverändert bleibt die Möglichkeit der Online-Aufzeichnung von Druck (PIR) und Druckverlust (PDIR) im Reaktor.

Mitte des Jahres wurde die Anlage auf das vielversprechende LOHC-System Perhydrobenzyltoluol/Benzyltoluol (H12-BT/H0-BT) umgestellt. Mit einem konventionellen Katalysator (0.3 wt% Pt/AlO_x) wurden Untersuchungen zu dessen Langzeitaktivität durchgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 3 der Verlauf der Platinproduktivität P des Katalysators über 70 Betriebsstunden bei einem Versuch mit definierten Bedingungen aufgezeigt.

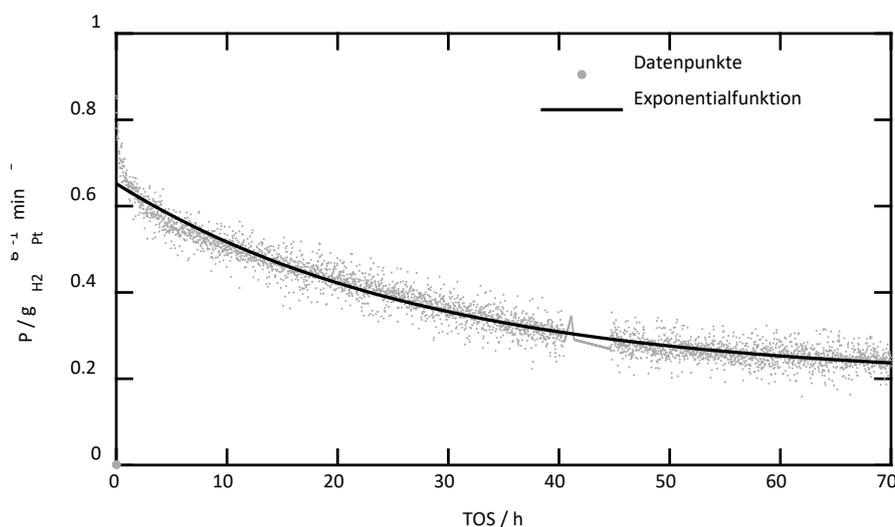


Abbildung 3 Versuchsaufzeichnung während der Untersuchung zur Langzeitaktivität eines Katalysators. Versuchsbedingungen: $m_{\text{Kat}} = 514 \text{ mg}$ ($3.15 \text{ mm} \leq d_p \leq 3.55 \text{ mm}$), $m_{\text{H12-BT}} = 0.3 \text{ g min}^{-1}$ (DoH > 95 %), $T = 285 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1.5 \text{ bar}$, $X < 10 \text{ \%}$

Deutlich zu erkennen ist eine stetige Abnahme der Wasserstofffreisetzung über die Zeit. Verläufe dieser Art lassen sich über Exponentialfunktionen zweiter Ordnung abbilden.³ Mit diesen Koeffizienten können Aussagen zu

³ F. Alhumaidan, D. Cresswell und A. Garforth, Long-Term Deactivation of Supported Pt Catalysts in the Dehydrogenation of Methylcyclohexane to Toluene, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(20), 9764-9770, 2010.

Deaktivierungsgeschwindigkeit und Aktivitätsverlust des Katalysators getroffen werden. Dies dient dem Vergleich verschiedener Deaktivierungsverläufe untereinander. Weitere Versuche deuten stark darauf hin, dass sich der Verlust an Katalysatoraktivität durch Veränderung der Betriebsbedingungen beeinflussen lässt. Dies gilt es im kommenden Jahr genauer zu untersuchen und mögliche Ursachen der Deaktivierung zu identifizieren. Des Weiteren sollen Wege gefunden werden, den Verlust der Produktivität eingesetzter Katalysatoren zu vermeiden, um in der Laboranlage verlässliche Reaktionskinetische Aussagen treffen zu können.

1.3 Thermochemische Energiespeicherung im LOHC-Prozess

Thermochemische Energiespeicher können Energie durch eine reversible endotherme Reaktion speichern, welche bei Bedarf durch die korrespondierende exotherme Rückreaktion wieder freigesetzt werden kann. Die Energie wird bei diesem Prozess als Wärme aufgenommen bzw. abgegeben. Diese Form der Speicherung ermöglicht es beispielsweise regenerative Energiequellen wie Solarkraftwerke besser nutzbar zu machen, Lastspitzen beim Energiebedarf auszugleichen und Abwärme industrieller Prozesse oder allgemein exothermer Reaktionen wie die LOHC-Hydrierung wiederverwenden zu können. Dabei sollen die eingesetzten Reaktanden möglichst ungiftig sein, eine gute Wärmeübertragung ermöglichen und eine hohe Energiedichte aufweisen.

Die beim LOHC-Hydrierungsprozess zur Verfügung stehende Wärme liegt auf einem Temperaturniveau von ca. 200 bis 300 °C. Somit ergibt sich ein Bedarf an Speichersystemen in diesem hohen Temperaturbereich. Im Allgemeinen weisen thermochemische Energiespeicher die theoretisch höchsten Wärmespeicherdichten auf und sind deshalb von großem Interesse. Der Fokus liegt auf Reaktionssystemen, welche auf Feststoffen basieren. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Systeme dargestellt, die auf Grund ihres Temperaturbereichs für dieses Teilprojekt besonders relevant sind.

Tabelle 1: Übersicht thermochemischer Energiespeicher

Reaktionssystem	Reaktionsgleichung	Anwendungsbereich
Calciumchlorid - Wasser	$CaCl_2 + n H_2O \rightleftharpoons CaCl_2 \cdot n H_2O + \Delta H_R$	< 200 °C
Magnesiumoxid - Wasser	$MgO + H_2O \rightleftharpoons Mg(OH)_2 + \Delta H_R$	250 - 350 °C
Zeolith Y (NaY) - Wasser	$NaY + n H_2O \rightleftharpoons NaY \cdot n H_2O + \Delta H_R$	150 - 300 °C

Das Ziel ist die Entwicklung eines effizienten, langzeitstabilen Speichers mit einer möglichst hohen Speicherkapazität. In der Literatur wurden bereits die Kinetik, Thermodynamik und Beständigkeit der Reaktionssysteme $CaCl_2/H_2O$ ⁴ und MgO/H_2O ⁵ eingehend analysiert. Allerdings wurde beim Einsatz der reinen Salze oder Metalloxide bei wiederholten Speicherzyklen eine Agglomeration der Partikel beobachtet. Dies wirkt sich negativ auf die Zyklusstabilität der Speichermaterialien aus. Deshalb werden die in Tabelle 1 genannten Verbindungen in poröse Trägermaterialien eingebracht, um eine Verbesserung des Wärme- und Stofftransports sowie der Zyklusstabilität zu erreichen. Aktuell liegt der Schwerpunkt auf Wasser als Wärmeüberträger und Reaktand, d.h. es wird für die Energiespeicherungen eine Dehydratisierungs- und für die Entladung eine Hydratisierungsreaktion durchgeführt. Zusätzlich werden reine Adsorptions- und Desorptionsprozesse von Wasser an porösen Materialien wie Zeolithen untersucht.

⁴ M. Molenda, J. Stengler, M. Linder, A. Wörner. (2013). Reversible hydration behavior of $CaCl_2$ at high H_2O partial pressures for thermochemical energy storage. *Thermochimica Acta*, 560, 76-81, 2013.

⁵ P. Pardo, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rougé, P. Cognet, M. Cabassud. Ca (OH) 2/CaO reversible reaction in a fluidized bed reactor for thermochemical heat storage. *Solar energy*, 107, 605-616, 2014.

Die nachträgliche Imprägnierung poröser Materialien führte zu einigen Problemen wie z.B. das Auskristallisieren der Reaktanden auf der Oberfläche der Träger oder eine starke Beladungslimitierung. Deshalb wurden neue Synthesestrategien entwickelt, bei denen die Reaktanden wie bspw. Magnesiumoxid zunächst in Form von Nanopartikeln synthetisiert werden. Anschließend wurden mit Hilfe von (organischen) Vorläuferverbindungen die Partikel in eine poröse Matrix (Träger) eingebaut, indem dieses um und zwischen einzelnen Partikeln wächst. Hierbei bieten sich vor allem Carbonisierungen von Kohlenstoffmaterialien oder angepasste Zeolithsynthesen an. Erste Ergebnisse von unterschiedlichen MgO-Partikeln sind in Abbildung 4 dargestellt. Durch unterschiedliche Synthesemethoden konnten Partikel mit plättchenförmiger bzw. sphärischer Morphologie erhalten werden, welche anschließend durch mikroporöse Kohlenstoffverbindungen verkapselt wurden (Abbildung 5).

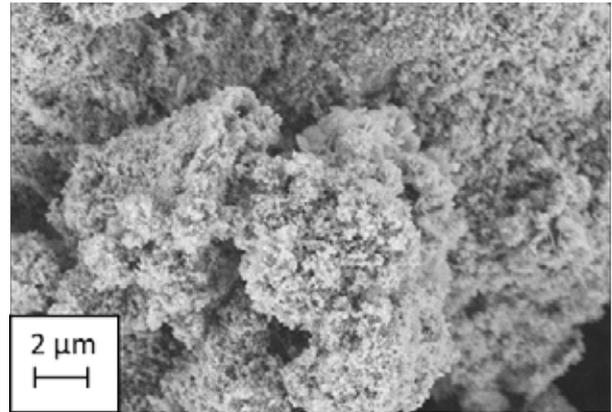
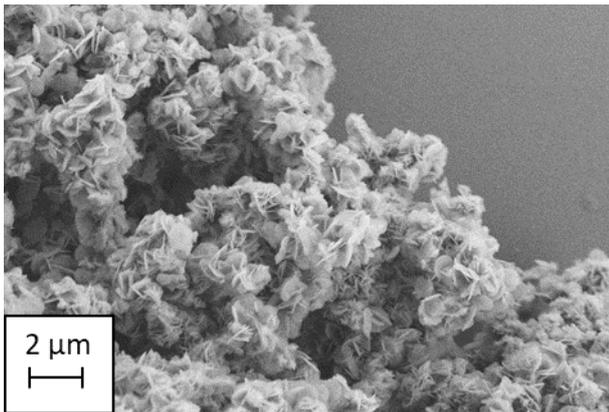


Abbildung 2: Agglomerate der synthetisierten MgO-Partikel: links plättchenförmig, rechts sphärisch.

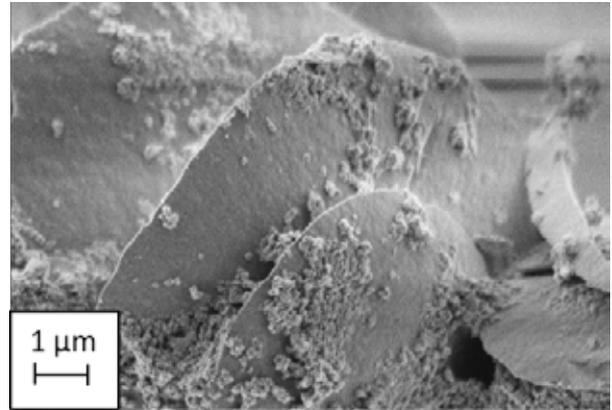
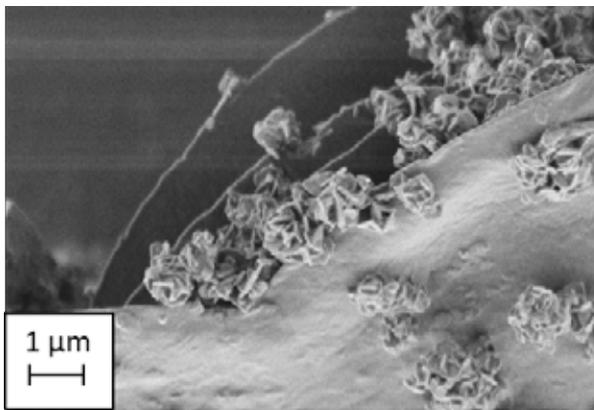


Abbildung 3: Verkapselte MgO-Partikel mit mikroporösen Kohlenstoffverbindungen: links plättchenförmig, rechts sphärisch.

Die Performance der neuartigen Kompositmaterialien wird aktuell an unserer STA-Anlage (Simultane Thermische Analyse) mit TG-DSC-Sensor (Thermogravimetrie, Dynamische Differenzkalorimetrie, engl. *differential scanning calorimetry*) getestet. Diese erlaubt es, neben dem Probengewicht, kalorimetrische Daten während des Energiespeicherungs- (Dehydratisierung) und Entladungsprozesses (Hydratisierung) aufzunehmen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse sind weitere Optimierungen geplant.

Außerdem werden in einer Laboranlage genaue Wärmeprofile von den Speicherungs- und Entladungsprozessen der bewährten Zeolith-Wasser-Systeme erstellt, um ein besseres Verständnis für den Anwendungsfall zu generieren, so dass in Zukunft eine optimale Wärmeintegration möglich ist.

2 Teilprojekt: Effiziente Wasserstofflogistik

2.1 Konzept zur direkten Beheizung eines LOHC-Freisetzers mit Hilfe eines Brenners

Im Teilprojekt wird ein neuartiges Heizkonzept für die Dehydrierung eines flüssigen organischen Wasserstoffträgers in LOHC-Speichersystemen entwickelt. Dabei wird die im Freisetzer erforderliche Energie über eine direkte Beheizung mit einem Brenner eingebracht.

Als Ziel wird in enger Abstimmung mit dem Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT, Prof. Wasserscheid) ein kombiniertes System aus Wärmeübertrager und Brenner für die Beheizung des Dehydrierers entworfen, dimensioniert, konstruiert und in Betrieb genommen. Im ersten Projektabschnitt wurde ein skalierbarer, kostengünstiger und voll funktionsfähiger Laboraufbau entwickelt und es erfolgte die Inbetriebnahme. Die Charakterisierung des Systems hinsichtlich des Strömungsverhaltens und des Wärmeeintrags geschah über eine simulative Abbildung. Es wurden experimentelle Untersuchungen zu Temperaturfeldern und zum Aufheizverhalten des LOHCs durchgeführt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgte dann ein Umbau des Versuchsstandes, um einen automatisierten Betrieb zu realisieren. Außerdem wurde die Möglichkeit eines LOHC-Kreislaufbetriebs hinzugefügt, die Druckregulierung im Dehydrierer überarbeitet und die bestehende Dehydriereinheit hinsichtlich Leckage und automatischer Brennerüberwachung optimiert.

Nachdem die Laboranlage (siehe Abbildung 6) im letzten Berichtszeitraum neu aufgebaut worden ist und nun über eine SPS gesteuert wird, lag der Fokus im abgelaufenen Jahr auf der Durchführung von Messreihen mit Wasserstofffreisetzung. Außerdem wurde der Brenner um eine elektrisch beheizte Verdampfeinheit ergänzt, so dass es jetzt möglich ist Flüssigbrennstoffe (z.B. Bio-Ethanol) zu verbrennen.

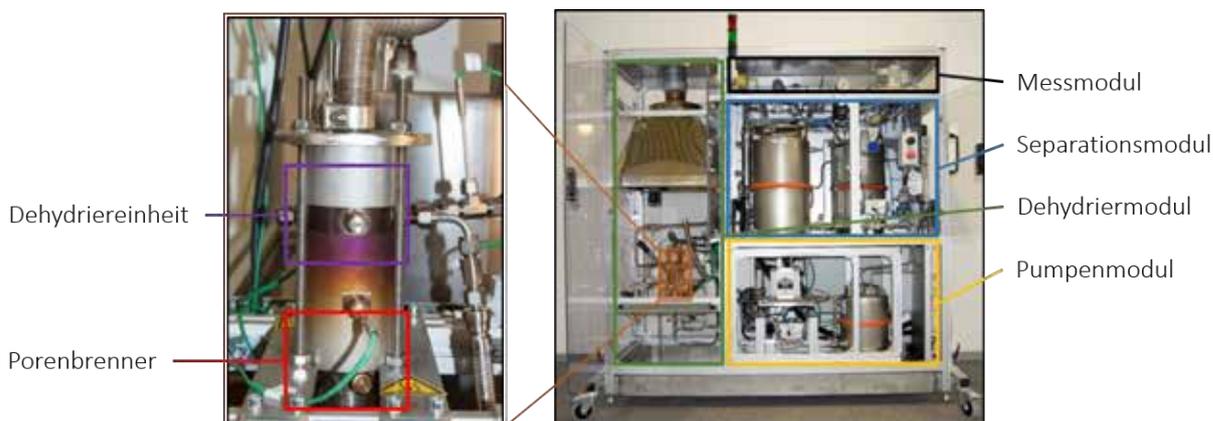


Abbildung 4: System mit einem Porenbrenner als Wärmequelle und der nachgeschalteten Dehydriereinheit (links) sowie die Laboranlage mit den wichtigsten Modulen (rechts).

In Abbildung 6 ist der aktuelle Stand der Versuchsanlage dargestellt. Die wesentlichen Bestandteile gliedern sich in ein Pumpen-, ein Dehydrier-, ein Separationsmodul zur Wasserstoffabtrennung und ein Messmodul zur Datenerfassung. Im Dehydriermodul befindet sich die aktuelle Dehydriereinheit, welche mit dem mehrstofffähigen Porenbrenner gekoppelt ist.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Anlage wurden Messreihen zur Wasserstofffreisetzung und zu den Schadstoffkonzentrationen des Porenbrenners für die Brennstoffe Methan und Ethanol durchgeführt. Zunächst lag der Fokus auf der Dynamik des Systems und dem Aufheizverhalten des LOHCs ohne Anwesenheit eines Katalysators im Dehydrierer. Bei den aktuellen Messungen liegt der Fokus auf der Temperaturverteilung im Dehydrierer für ein System aus LOHC, Katalysator und Wasserstoff, sowie auf dem resultierenden Wasserstoffenthalpiestrom. Die Schadstoffkonzentrationen des Porenbrenners wurden im Abgasstrang nach dem Dehydrierer mit einem Abgasmessgerät vom Typ Testo 350 XL über eine Sonde gemessen. Die Randbedingungen in der Dehydriereinheit sind für die Messungen mit den Brennstoffen Methan und Ethanol identisch. Das Innenvolumen des Dehydrierers beträgt 20 cm^3 und enthält

8,16 g Pt/AlO_x (Katalysator von Hydrogenious Technologies). Der verwendete LOHC hat einen Hydriergrad von mindestens 95 % und wird mit 0,2 kg/h in den Dehydrierer gepumpt. Die Versuche finden bei einem Druckniveau von 1 bar im Dehydrierer statt. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen für den Betrieb des Porenbrenners mit Methan sind in Abbildung 2 und die Ergebnisse für den Betrieb mit Ethanol sind in Abbildung 7 zu sehen.

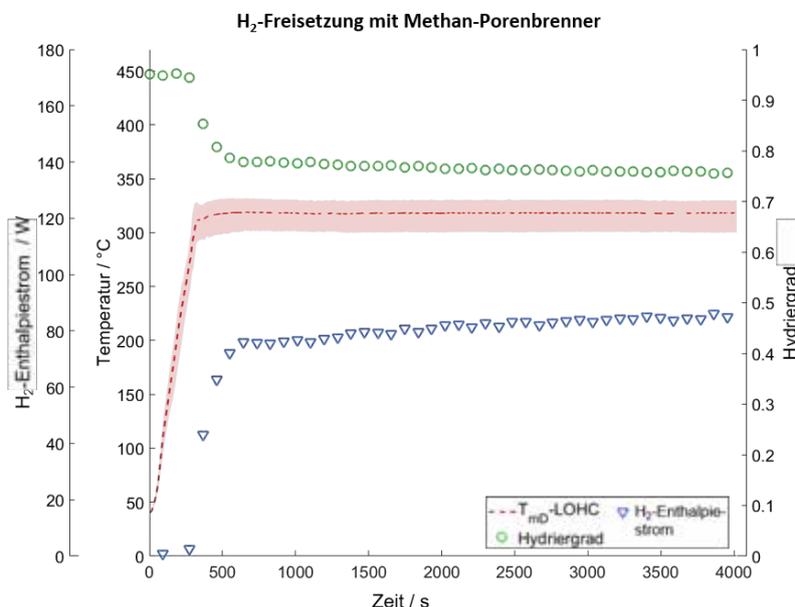


Abbildung 5: Wasserstofffreisetzung, Hydriergrad und LOHC-Temperatur mit dem Methan-betriebenen Porenbrenner für eine Brennerleistung von 0,5 - 1,5 kW und einen LOHC-Massenstrom von 0,2 kg/h; gezeigt sind jeweils Mittelwerte aus 3 Versuchsreihen. Der schattierte Bereich der Temperatur (min/max) stellt die Temperaturunterschiede im LOHC zwischen Einlass und Auslass des Freisetzers dar.

Für die Messungen im Methanbetrieb erfolgte die Regelung der erforderlichen Brennerleistung (in einem Bereich von 0,5 kW bis 1,5 kW) über einen PID-Regler entsprechend der vorgegebenen Sollwerttemperatur im Dehydrierer von $\vartheta_{\text{soll}} = 320$ °C. Das relative Luft-Brennstoffverhältnis λ wird konstant bei 1,2 gehalten. Die Temperaturverteilung im Dehydrierer zeigt einen raschen Anstieg, so dass die Solltemperatur $\vartheta_{\text{soll}} = 320$ °C bereits nach ca. 4 min erreicht wird. Im Anschluss stellt sich ein sehr konstanter Temperaturverlauf mit einer Abweichung von ± 15 K zwischen Einlass und Auslass ein (hellroter Bereich in Abbildung 2). Die Abgastemperatur des methanbetriebenen Porenbrenners beträgt ca. 650 °C vor und ca. 320 °C nach der Dehydriereinheit, was die hervorragende Abgaswärmenutzung zeigt. Die Wasserstofffreisetzung setzt nach ca. 8 min ein und es entsteht ein H₂-Enthalpiestrom von 80 W bis 90 W. Somit wird ca. 22 % des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs in einem Durchlauf freigesetzt. Die zeitliche Verzögerung der Wasserstoffdetektion im Vergleich zum Erreichen der Sollwerttemperatur ϑ_{soll} liegt vermutlich am großen Abstand zwischen dem Dehydrierer und dem Wasserstoffdetektor in der Versuchsanlage. Als Ursache, für die nicht vollständige Freisetzung des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs, kann das geringe Innenvolumen und die dadurch kurze Verweilzeit des LOHC im aktuellen Dehydrierer angesehen werden. Die Ergebnisse unterstreichen die hohe Systemdynamik bei der direkten Beheizung des Dehydrierers mit einem Brenner. Die nun in einem weiten Leistungsbereich durchgeführten Schadstoffmessungen im Methanbetrieb bestätigen die bereits im letzten Jahresbericht veröffentlichten Messdaten. Die NO_x-Konzentration ist sehr gering und liegt über dem Messzeitraum bei ca. 35 ppmV. Nach der Zündung treten kaum noch CO-Emissionen auf, dies deutet auf eine vollständige Verbrennung des Methans hin.

Die Messungen im Ethanolbetrieb (siehe Abbildung 8) wurden mit einer konstanten Brennerleistung von 1,0 kW, einem relativen Luft-Brennstoffverhältnis λ von 1,3 durchgeführt und bei einer Temperatur von $\vartheta_{\text{ist}} = 330$ °C im Dehydrierer beendet. Die Temperaturverteilung im Dehydrierer zeigt hierbei einen langsameren zeitlichen Anstieg, so dass $\vartheta_{\text{ist}} = 330$ °C nach ca. 19 min erreicht wird. Die Abweichungen im Dehydrierer zeigen einen konstanten Verlauf in einem Bereich von ± 15 K zwischen Einlass und Auslass (hellroter Bereich in Abbildung 3). Die Abgastemperatur des ethanolbetriebenen Porenbrenners beträgt ca. 580 °C vor der Dehydriereinheit und ca. 320 °C nach der Dehydriereinheit, was wiederum die hervorragende Übertragung der Abgaswärme in den Freisetzer zeigt. Die Wasserstofffreisetzung setzt

nach ca. 25 min ein und es resultiert ein H_2 -Enthalpiestrom von 60 W in der Spitze. Die Schadstoffkonzentrationsmessungen für den Ethanolbetrieb zeigen ein ähnliches Bild wie für den Methanbetrieb. Der große Unterschied liegt in der NO_x -Konzentration. Diese liegt über den Messzeitraum bei ca. 6 ppmV und ist somit deutlich kleiner als bei Methan. Der Grund der reduzierten NO_x -Konzentration liegt in der deutlich geringeren Verbrennungstemperatur im Vergleich zu Methan.

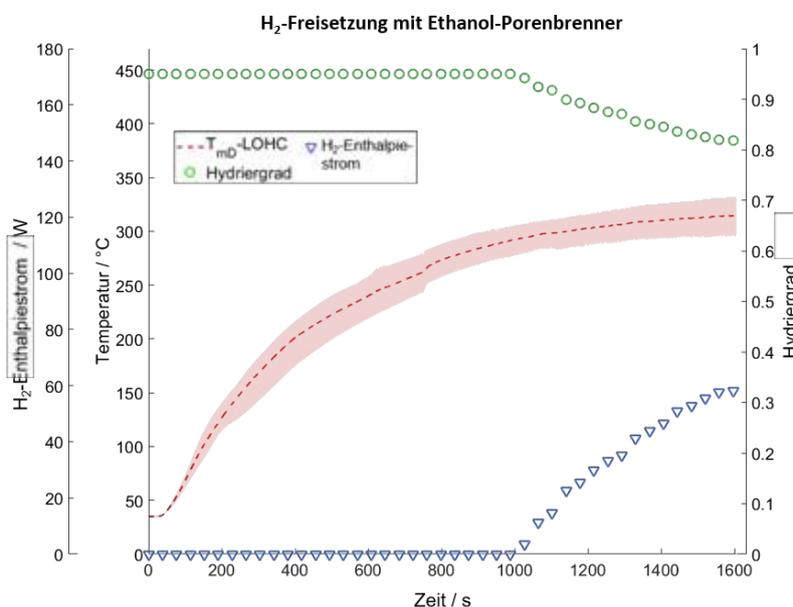


Abbildung 6: Wasserstofffreisetzung, Hydriergrad und LOHC-Temperatur mit Ethanol-Porenbrenner für eine Brennerleistung von 1,0 kW und einen LOHC-Massenstrom von 0,2 kg/h. gezeigt sind jeweils Mittelwerte aus 3 Versuchsreihen. Der schattierte Bereich der Temperatur (min/max) stellt die Temperaturunterschiede im LOHC zwischen Einlass und Auslass des Freisetzers dar.

Bedingt durch die unterschiedlichen Betriebsbedingungen (dynamische Regelung des Brenners beim Methanbetrieb vs. konstante Brennerleistung beim Ethanolbetrieb) ist ein direkter Vergleich zwischen Methan- und Ethanolbetrieb nur schwer möglich. Die vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen aber die Mehrstofffähigkeit des Systems, sowie die Dynamik einer direkten Beheizung des Dehydrierers sowohl für gasförmige als auch für flüssige Brennstoffe. Es sollen weitere Messungen mit vergleichbaren Randbedingungen für beide Brennstoffe durchgeführten werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Auslegung und Konstruktion eines leistungsstärkeren Dehydrierers, der im letzten Projektjahr in Betrieb genommen wird. Mit diesem werden die aktuellen Messreihen wiederholt und anschließend vergleichend ausgewertet. Abschließend erfolgt über eine Wirtschaftlichkeitsanalyse ein Vergleich mit alternativen Dehydrierkonzepten, die gewonnenen Ergebnisse werden zusammengefasst und Konzepte zum weiteren Scale-Up erstellt. Über den aktuellen Stand des Projekts wurde 2020 auf der EnCN-Jahreskonferenz berichtet. Des Weiteren wird aktuell eine studentische Arbeit im Rahmen der Forschungstätigkeit betreut.

2.2 Beschichtete Plattenkatalysatoren für homogenen Wärmeeintrag

Die Dehydrierung von H_{18} -DBT ist eine stark endotherme Reaktion. Bisherige Dehydrierreaktoren basieren meist auf einer Katalysatorpelletschüttung, die von äußeren Wandungen beheizt wird. Da die Reaktion Wärme verbraucht, bildet sich ein fallender Temperaturgradient von der beheizten Wand zum Inneren der Katalysatorschüttung aus, so dass die Katalysatorpellets direkt an der Wand mehr Wasserstoff freisetzen als die im Inneren der Schüttung. Im letzten Projektjahr wurde bereits gezeigt, dass elektrisch beheizbare Gitterstrukturen mit einer Katalysatorschicht beschichtet werden und für Dehydrierversuche eingesetzt werden können. Im weiteren Verlauf wurden beschichtete Plattenkatalysatoren untersucht, bei denen sich der Katalysator unmittelbar an der beheizten Oberfläche befindet, um die Ausnutzung des Katalysatoredelmetalls zu erhöhen.

Dazu wurden 1,8 cm x 5 cm große Metallplättchen aus hochtemperaturresistentem Edelstahl mit einer Dispersion aus dem Trägermaterial beschichtet, kalziniert und mit dem Platinpräkursor imprägniert. Durch die anschließende Reduktion wurde das aktive Edelmetall gebildet, sodass der Pt/Al₂O₃-Katalysator für die Dehydrierung von H₁₈-DBT verwendet werden konnte. Diverse Parameter der Präparationsmethode, wie z.B. Dicke der Trägerschicht, Platinbeladung, Präkursorspezies und Reduktionstemperatur, wurden variiert, um einen möglichst aktiven Plattenkatalysator ausfindig zu machen, der zudem möglichst wenige Nebenprodukte bildet.

Die Katalysatoren wurden in einem Screening-Reaktor getestet, in dem zwölf Dehydrierungen gleichzeitig unter identischen Bedingungen stattfinden konnten (siehe Abbildung 9). Durch die Analyse von jeweils vier LOHC-Proben war es möglich, die Katalysatoren unabhängig von deren Aktivitäten über zwei Performance-Parameter miteinander zu vergleichen: Der Parameter A_{25%} beschreibt die Wasserstofffreisetzung pro beschichteter Metallfläche bei einem Dehydriergrad von 25 % und der Parameter HSA_{80%} beschreibt den Hochsiederanteil (höhersiedende Nebenprodukte) im LOHC bei einem Dehydriergrad von 80 %.

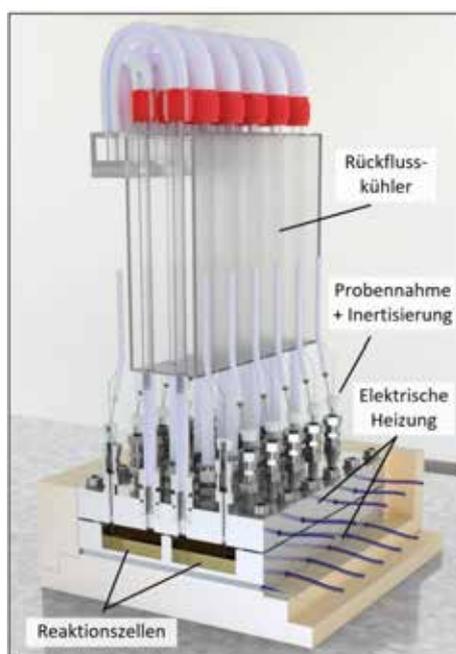


Abbildung 7: CAD-Modell des Screening-Reaktors mit Halbschnitt durch zwei Reaktionszellen.

Aufgrund der makroporösen Struktur der Trägerschicht, haben weder die Schichtdicke des Trägers noch die Platinbeladung allein einen signifikanten Einfluss auf die Aktivität der Katalysatoren. Vielmehr ist die Gesamtmenge an Platin, die pro Quadratzentimeter Metallsubstrat abgeschieden wurde, die maßgeblich aktivitätsbestimmende Größe.

Durch hochbeladene, dünne Schichten konnte vergleichsweise mehr Wasserstoff freigesetzt werden als bei dickeren Schichten mit gleicher Platinmenge. Insgesamt kann die Aktivität gesteigert werden, wenn die Menge an Platin in der Katalysatorschicht erhöht wird. Sämtliche Plattenkatalysatoren, die mit dem Präkursor Hexachloroplatinsäure hergestellt wurden, wiesen jedoch unabhängig von der abgeschiedenen Platinmasse sehr hohe HSA_{80%}-Werte von über 9 wt% auf (siehe Abbildung 5).

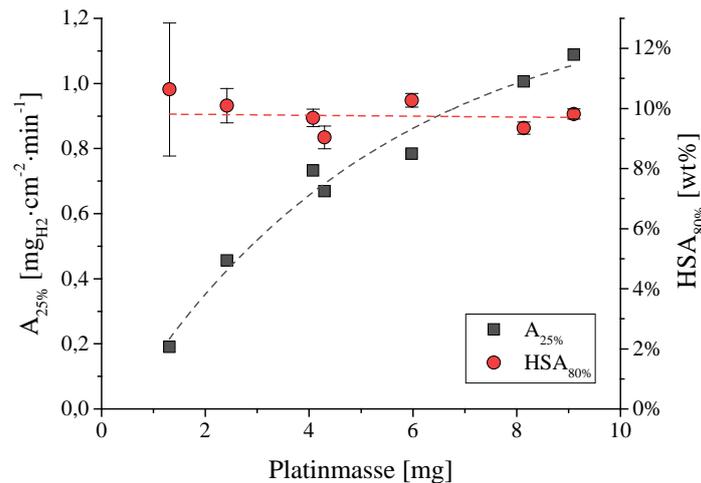


Abbildung 8: Aktivität und Hochsiederbildung aufgetragen über die Platinmasse. $16,6 \text{ cm}^2$ beschichtete Metallfläche, $m_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 68 - 446 \text{ mg}$, $B = 1 - 2,6 \text{ wt\%Pt}$, $PC = \text{Hexachloroplatinsäure}$.

Es ist bereits bekannt, dass die Nebenproduktbildung durch eine Nachbehandlung mit schwefelhaltigen Komponenten stark minimiert werden kann⁶. Durch die Verwendung von einer sauren Platinsulfid-Lösung als Präkursor während der Katalysatorpräparation wird der Schwefel direkt bei der Imprägnierung mit aufgebracht. Dadurch konnten wesentlich geringere $\text{HSA}_{80\%}$ -Werte von unter $3,6 \text{ wt\%}$ erzielt werden. Gleichzeitig wurden durch höhere Platinkonzentrationen Aktivitäten von $2,4 \text{ mg}_{\text{H}_2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ bei Produktivitäten von $1,35 \text{ g}_{\text{H}_2} \cdot \text{g}_{\text{Pt}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ erzielt (siehe Abbildung 6).

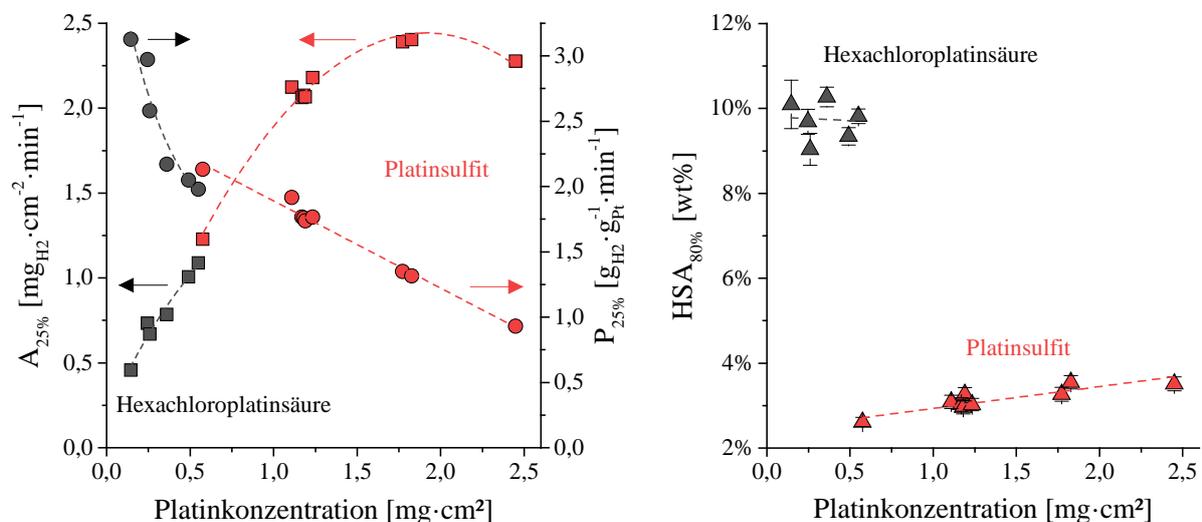


Abbildung 9: Vergleich der Aktivitäten (Quadrats), Produktivitäten (Kreise) und der Hochsiederbildung (Dreiecke) von Katalysatoren aus Hexachloroplatinsäure (schwarz) und Platinsulfid (rot) im Screening-Reaktor.

Mit diesen Ergebnissen wurde eine Präparationsmethode für Plattenkatalysatoren gefunden, die im nächsten Schritt auf größere Bleche angewandt werden kann, um diese in einem kontinuierlich betriebenen reaktiven Plattenwärmetauscher zu verwenden. Erste Ergebnisse zeigen, dass dadurch deutlich höhere Aktivitäten erreicht werden als mit einer herkömmlichen Katalysatorpelletschüttung.

⁶ F. Auer, D. Blaumeiser, T. Bauer, A. Bösmann, N. Szesni, J. Libuda, P. Wasserscheid. Boosting the activity of hydrogen release from liquid organic hydrogen carrier systems by sulfur-additives to Pt on alumina catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 9 (13), 3537-3547, 2019.

2.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Der Einsatz von wasserstoffbasierten synthetischen Kraftstoffen wie beispielsweise E-Fuels ermöglicht eine CO₂-neutrale Mobilität und eröffnet damit eine Alternative zu fossil betriebenen Motoren oder batteriegespeister Elektromobilität. Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts zwischen Forschern der Ingenieurwissenschaften (Speicher B) und Wirtschaftswissenschaften (Energiamarktdesign) wird die Wirtschaftlichkeit von Fischer-Tropsch-Diesel, Methanol und Wasserstoff, der als kryogene Flüssigkeit (LH₂) oder in Form von flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHC) gespeichert wird, verglichen. Die Produktionskosten dieser Kraftstoffe werden zu einem großen Teil durch die energieintensive elektrolytische Wasserspaltung bestimmt. Die Option E-Fuels in Deutschland zu produzieren, konkurriert mit internationalen Standorten mit exzellenten Bedingungen für die Gewinnung erneuerbarer Energien und damit sehr niedrigen Stromgestehungskosten. Für diesen Vergleich wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die gesamte Prozesskette abdeckt. Angefangen bei der Gewinnung der benötigten Ressourcen wie Süßwasser, Wasserstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, elektrische und thermische Energie, über die anschließende chemische Synthese, den Transport zu den Tankstellen in Deutschland und schließlich die energetische Nutzung der Kraftstoffe im Fahrzeug. Es zeigte sich, dass die Wahl des Produktionsstandortes einen großen Einfluss auf die Mobilitätskosten der jeweiligen Kraftstoffe haben kann. Insbesondere bei der Dieselproduktion haben die Stromkosten einen erheblichen Einfluss auf die Produktionskosten. Es konnte gezeigt werden, dass ein LOHC-basiertes System aufgrund des vergleichsweise geringen Stromverbrauchs und der niedrigen Kosten für die Hydriereinheiten weniger abhängig von der Art und den Kosten der genutzten Stromquelle ist als andere Technologien. Die Länge des Transportweges und der Preis für die Tankstelleninfrastruktur erhöhen dagegen die Mobilitätskosten für LOHC und LH₂ deutlich (vgl. Runge et al., 2020).

In einem aktuellen Projekt werden die Auswirkungen der Wasserstoff- und SynFuel-Produktion auf die Übertragungs- und Erzeugungsinvestitionen im deutschen Stromsystem untersucht. Dazu wird ein Gleichgewichtsmodell entwickelt, um die Effekte einer großskaligen Nutzung von Wasserstoff und SynFuels in liberalisierten Strommärkten zu analysieren. Das Modell weist dabei eine mehrstufige Struktur auf, um zu berücksichtigen, dass die Investition und der Betrieb des Wasserstoff- und SynFuel-Systems sowie die Investition und der Betrieb der Stromerzeugung von privaten Investoren entschieden werden, während der Netzausbau und der Betrieb von regulierten Übertragungsnetzbetreibern entschieden werden. Das Modell erlaubt es, zukünftige stündliche Strompreise endogen zu berechnen und die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoff- und SynFuel-Produktion unter verschiedenen zukünftigen Rahmenbedingungen zu bewerten. Um die langfristigen wirtschaftlichen Effekte unter verschiedenen aktuell in Politik und Wissenschaft diskutierten Rahmenbedingungen zu quantifizieren, wird das Modell für den deutschen Strommarkt kalibriert. Dabei wird für die Wasserstoff- und SynFuel-Produktion innerhalb Deutschlands die gesamte Prozesskette von der Wasserstoffherzeugung über die chemische Bindung bis zur Belieferung der Endkonsumenten betrachtet. Da die Option Wasserstoff und darauf basierende synthetische Energieträger in Deutschland zu produzieren, in Konkurrenz zu internationalen Standorten mit sehr guten Bedingungen für die regenerative Energieerzeugung - und damit sehr niedrigen Stromkosten - steht, wird zusätzlich ein Import der Energieträger berücksichtigt.

2.4 Wärmeübertragungskompressor für die LOHC-Vorwärmung

In diesem Projektabschnitt werden zwei verschiedene Anlagen zur Wasserstoffkompression untersucht. Im Jahr 2020 wurden Versuche am Kolbenkompressor erstmals erfolgreich auch mit Wasserstoffgas durchgeführt. Zunächst wurden CFD-Modelle erstellt, um die Austrittstemperatur des komprimierten Gases im Kompressor für verschiedene Kolbengeschwindigkeiten zu ermitteln. In diesem Modell wird angenommen, dass nur das Wasserstoffgas ohne LOHC in der Kompressorkammer verdichtet wird. Mit diesem vereinfachten Modell kann bestimmt werden, wie viel Wärme durch Wärmekonvektion an die Innenwände des Kompressors übertragen wird. Die Simulationen werden für einen adiabatischen Kompressionsprozess durchgeführt und mit der analytischen Berechnung verglichen. Die Simulationsergebnisse für die adiabatische Verdichtung waren im Vergleich zu den analytischen Ergebnissen sehr genau. Für den polytrophen Kompressionsprozess im Simulationsmodell wird die Temperatur der Kompressorwände während des Kompressionsprozesses konstant gehalten. Für die aktuelle Simulation sind im Anfangszustand eine Eintrittstemperatur von 293,15 K, ein Absolutdruck von 3 bar und eine axiale Kolbengeschwindigkeit von 40 mm/s gegeben. Der Verdichter

hat eine Hublänge von 350 mm, wobei das Gas von 0 bis 340 mm verdichtet wird. Abbildung 7 zeigt, dass bei der Verdichtung von Wasserstoff nach dem idealen Gasgesetz unter den oben genannten Bedingungen ein Druck von 170 bar erreicht wird und die Temperatur auf 574 K steigt.

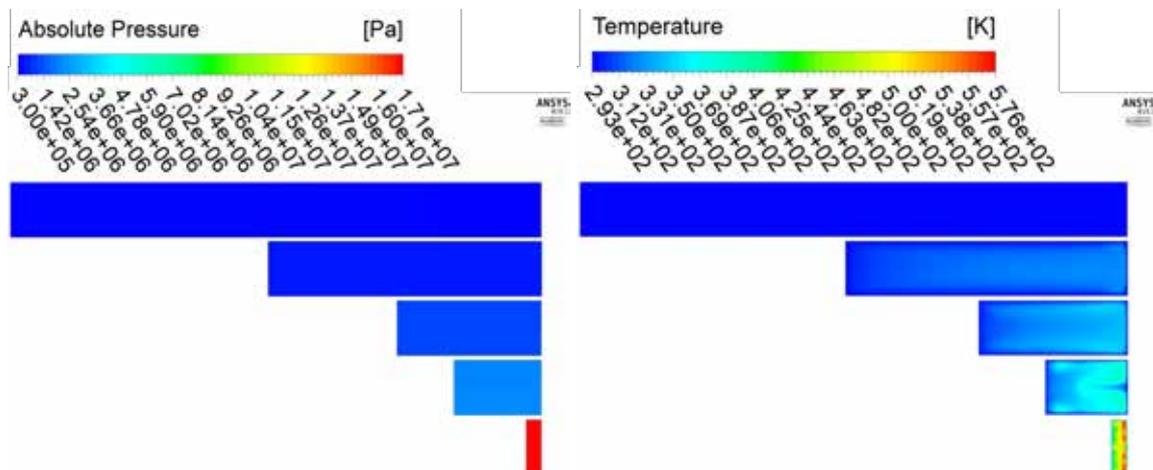


Abbildung 10: Druckanstieg und Temperaturanstieg während der Kompression.

Abbildung 8 zeigt den Temperaturanstieg des Gases für verschiedene Plungergeschwindigkeiten im Vergleich zum adiabatischen Prozess. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher ist die Temperatur des Gases am Kompressor-Austritt, da weniger Zeit für die Abkühlung des Gases vorhanden ist.

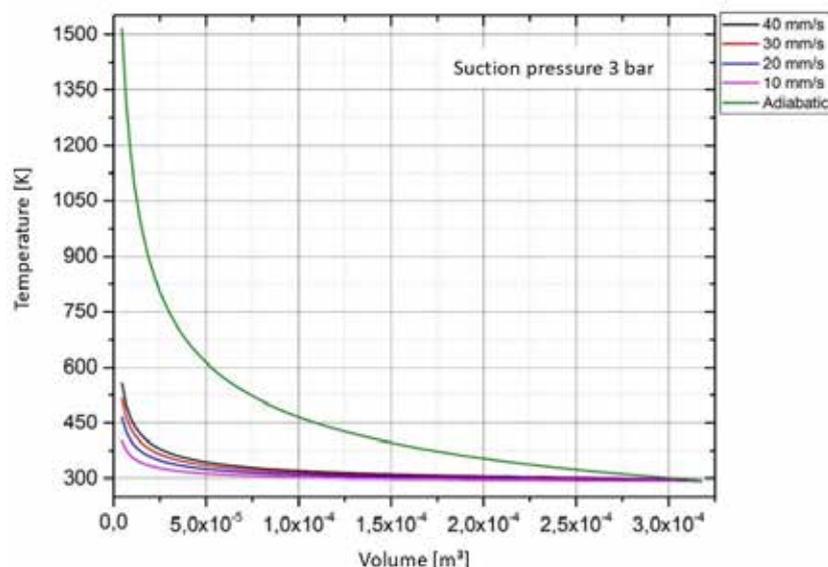


Abbildung 11: Vergleich der Gastemperatur bei adiabatischer Verdichtung und bei Verdichtung mit unterschiedlichen Plungergeschwindigkeiten.

Abbildung 9 zeigt die Messung der Temperatur für einen kompletten Zyklus eines Realversuchs mit Wasserstoff in der Kolbenkompressoranlage. Der Wasserstoff wurde von 2 bar auf 163 bar Relativdruck komprimiert, was zu einem Gastemperaturanstieg auf 331 K führte. Bei der aktuellen Messung wurde der Kompressor mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s und nicht voll durchgeführtem Hub betrieben. Die LOHC-Flüssigkeitsschicht befand sich oberhalb des Plungers, wodurch das Gas effektiv gekühlt wurde. Da die Betriebsbedingungen für die Simulation und die Messungen nicht die gleichen waren, können sie vorerst nicht verglichen werden.

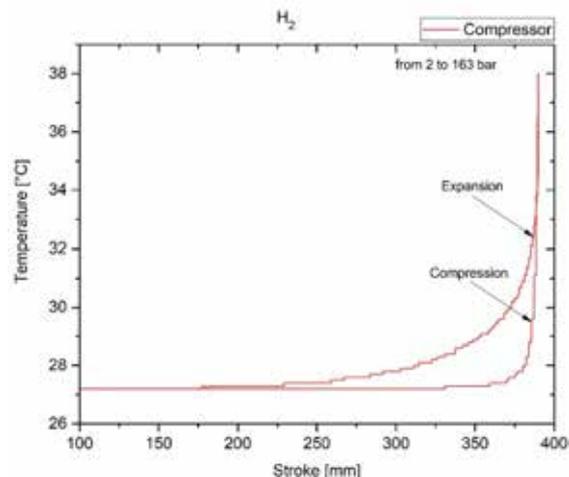


Abbildung 12: Wasserstofftemperatur während eines Zyklus im Kolbenkompressor.

Diese vorläufigen Ergebnisse sind bei einer ersten Testreihe in der Anlage entstanden, deren Hauptzweck die Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion und eines sicheren Betriebs mit Wasserstoffgas war. Weitere Tests sind im nächsten Jahr für die maximal ausgelegten Parameter geplant. Danach müssen die Messungen mit Simulationen verglichen und validiert werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts soll eine zweite Testanlage für eine ähnliche Anwendung untersucht werden. Wie in den vorherigen Berichten schon angekündigt, sind bei dieser Schraubenkompressor-Anlage noch weitere Arbeiten erforderlich, um den Aufbau abzuschließen.

3 Teilprojekt: Effiziente Wasserstoffnutzung

3.1 BHKW im Wasserstoff–Erdgas–Mischbetrieb

Im letztjährigen Bericht konnte gezeigt werden, dass durch eine Nutzung von Wasserstoff in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) eine deutliche Reduktion der CO₂-Emission im Vergleich zu einem mit reinem Methan befeuerten BHKW erreicht werden kann. Abbildung 10 zeigt das Potential für die Einsparung an CO₂ in Abhängigkeit von der Dehydriertemperatur, die beispielsweise mittels Transferdehydrierung erreicht werden kann. Dabei ist in rot der emissionsoptimale Betrieb (obere Linie im Diagramm), das heißt der beim niedrigsten indizierten Wirkungsgrad und in schwarz (untere Linie im Diagramm) der effizienzoptimale Betrieb, das heißt beim besten thermodynamischen Wirkungsgrad, dargestellt.

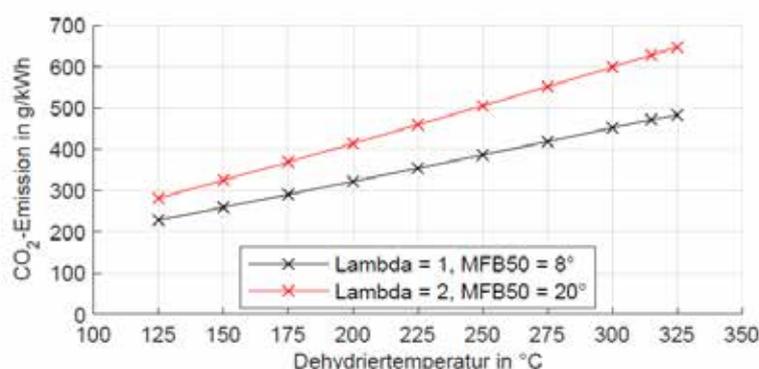


Abbildung 13: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von der Dehydriertemperatur für den wirkungsgradoptimalen Betrieb (rot) und den emissionsminimalen Betrieb (schwarz).

Im Jahr 2020 wird vor allem der Übertrag aller bisherigen Ergebnisse auf ein Gesamtsystem aus Blockheizkraftwerk (repräsentiert durch einen Stromerzeuger) und Dehydrierreaktor samt aller Peripherie vorbereitet. Als Stromerzeuger wird dabei das Modell EU70is aus dem Hause Honda gewählt. Dieser hochmoderne Stromerzeuger besitzt anstelle des bei Stromerzeugern noch weit verbreiteten Vergasers einen Saugrohrinjektor, wodurch das Benzin besser und

kontrollierter dosiert werden kann als bei einem Vergaser. Um volle Kontrolle über Zündzeitpunkt und eingespritzte Kraftstoffmengen zu haben, wird das Aggregat mit einer frei programmierbaren Motorsteuerung vom Typ SYVECS S6Plus ausgestattet. Die Motorsteuerung ist so verschaltet, dass sie wahlweise die Zündung, die Einspritzung oder beides von der originalen Motorsteuerung übernehmen kann. Des Weiteren ist das Aggregat mit einer Breitbandlambdasonde und einem Thermolement im Abgaskrümmen ausgestattet, um Temperatur und Lambda-Wert des Abgases zu überwachen.

Da Wasserstoff aufgrund seiner weiten Zündgrenzen, seiner niedrigen Zündenergie und der geringen Grenzspaltweite bei Saugrohreinblasung zur vorzeitigen Entflammung neigt, wird der Wasserstoff bzw. das Wasserstoff-Methangemisch direkt in den Brennraum eingeblasen. Dieses Vorgehen bringt außerdem den Vorteil, dass die hohe Luftverdrängung (ca. 1/3 der Ladung) und der damit einhergehende Leistungsverlust vermieden werden kann. Die Einblasung wird erst begonnen, wenn die Einlassventile bereits geschlossen sind. Zur Einbringung des Wasserstoffinjektors in den zur Verfügung stehenden Bauraum (Änderung des Zylinderkopfs), wurde vom Zylinderkopf ein 3D-Scan angefertigt. Die dadurch gewonnenen Geometriedaten erlauben eine detaillierte Konstruktion im CAD. Die Tatsache, dass der gewählte Stromerzeuger einen Motor mit Luftkühlung und untenliegender Nockenwelle besitzt, erleichtert dieses Vorhaben, da weder Wasserkanäle noch die Nockenwelle die Platzierung des Injektors behindern. Abbildung 11 zeigt das 3D-Modell des Zylinderkopfes, das zur Platzierung des Injektors verwendet wird. Darin ist der Wasserstoffinjektor mit blauem Kunststoffgehäuse dargestellt.

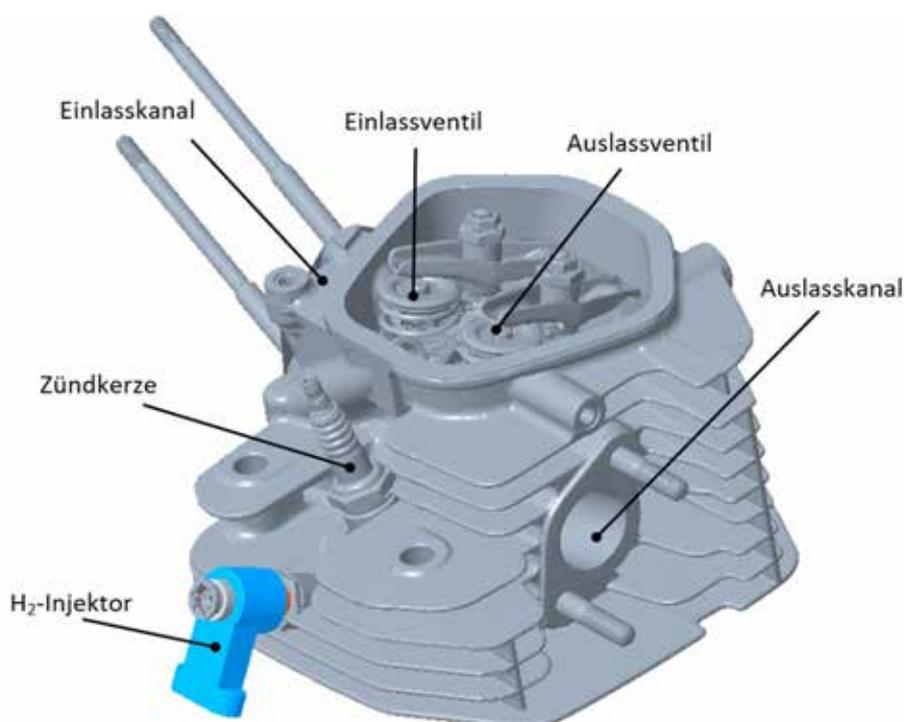


Abbildung 14: 3D-CAD Modell des Zylinderkopfes.

Die genaue Anordnung des Injektors kann der Schnittansicht des Zylinderkopfes in Abbildung 12 entnommen werden. Die Längsachse des Injektors ist dabei um 30° zur Trennebene zwischen Zylinderkopf und Zylinder geneigt. Dadurch dringen die Spraykeulen parallel zum Brennraumdach mittig in den Zylinder ein. Mit dieser Positionierung wird eine gute Gemischbildung mit wenig Eindringen des Wasserstoffs in den Ringspalt des Motors erreicht. Mit dieser Konfiguration des Stromerzeugers sollen alsbald Messungen mit dem Realsystem Verbrennungsmotor mit Dehydrierreaktor durchgeführt werden.

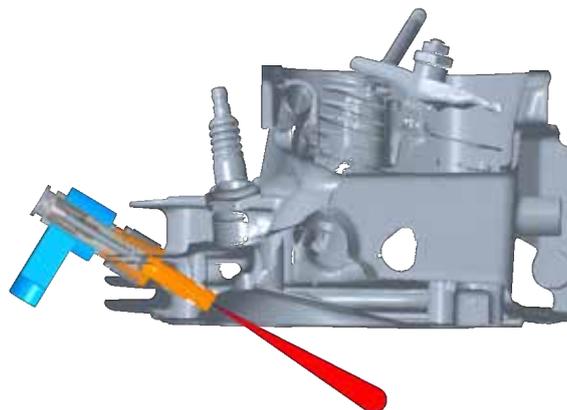


Abbildung 15: Schnittansicht des Zylinderkopfs mit Platzierung des Injektors und erwartete Wasserstoffkeulen (rot).

Eine für Wasserstoffmotoren ebenfalls sehr interessante innovative Weiterentwicklung ist die sogenannten aktive Vorkammerzündung. Dabei wird anstelle der Zündkerze ein weiteres Bauteil in den Motor eingebracht. Dieses bildet einen kleinen Raum (Vorkammer) in die von außerhalb ein Kraftstoffdampf oder Brenngas eingebracht werden kann. An der Spitze der Vorkammer sind Übertrittsbohrungen angebracht, die es der in der Vorkammer gezündeten Ladung ermöglicht in den Hauptbrennraum überzutreten und dort das eigentliche Gemisch zu entflammen. Am anderen Ende der Vorkammer sitzt die ursprüngliche Zündkerze, die es erlaubt die Ladung in der Vorkammer zu entflammen. Abbildung 13 zeigt eine solche Vorkammerzündkerze.



Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Vorkammerzündkerze mit Flammenkeulen (rot).

Die Besonderheit der aktiven Vorkammerzündkerze liegt dabei daran, dass von außen aktiv ein gasförmiger Brennstoff (Dampf eines flüssigen Brennstoffs oder ein Brenngas wie Wasserstoff) zugeführt werden kann. Dies erlaubt es, auch bei extrem mageren Gemischen im Hauptbrennraum, die mit einer herkömmlichen Funkenzündung nicht mehr entflammt werden können, ein ausreichend fettes und daher zündfähiges Gemisch in der Vorkammer bereit zu stellen. Für Wasserstoffmotoren und den Methan-Wasserstoff-Mischbetrieb ist wichtig, dass mit diesem Hochenergie-Zündsystem auch für sehr schwache Gemische (starkverdünnte Brennraumladungen) wirkungsgradgünstige hohe Brenngeschwindigkeiten erreicht werden können. Tritt das in der Vorkammer entzündete brennende Gemisch in den Hauptbrennraum über, besitzt es so viel Energie, dass es in der Lage ist, auch zündunwillige Gemische zu entflammen und schnell umzusetzen. In Abbildung 14 sind die Parameter indizierter Wirkungsgrad (links) und Roh-NO_x über dem Verbrennungsluftverhältnis Lambda für einen Ottomotor betrieben zunächst mit Benzin dargestellt.

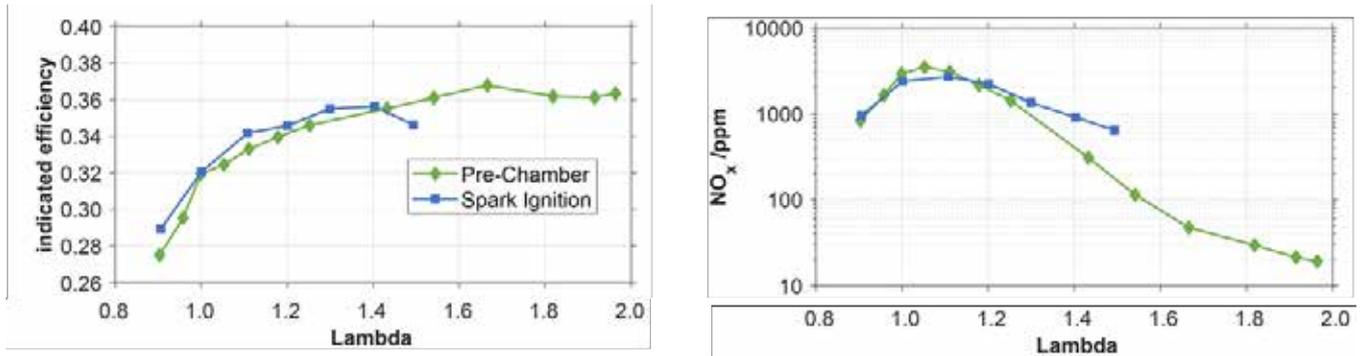


Abbildung 17: Indizierter Wirkungsgrad (links) und Stickoxid-Rohemissionen (rechts) über dem Verbrennungsluftverhältnis Lambda.

Mit der Vorkammerzündung können sehr magere Lambda-Werte erreicht werden, die mit herkömmlicher Funkenzündung nicht möglich sind. Dabei zeigt sich vor allem ein steigender Wirkungsgrad sowie sinkende Stickoxid Rohemissionen mit steigendem Lambda.

Bei Wasserstoffmotoren bzw. Motoren mit Wasserstoff-Erdgas Mischbetrieb liegt aufgrund der weiten Zündgrenzen die Problematik nicht wie bei Benzin in der Entflammung des Gemisches, die mit einer konventionellen Funkenzündung auftritt. Das Problem, das jedoch bei verdünnten Brennraumladungen auch mit Wasserstoff auftritt, ist eine starke Abnahme der Brenngeschwindigkeit. Vor allem in Motoren mit hohen Einzelzylinderhubvolumen führt dies zu einer sehr langen Brenndauer, die dann einem wirkungsgradoptimalen Ausbrand (Gleichraumgrad der Verbrennung sinkt) entgegensteht. Hier kommt der Effekt der Vorkammer der brennenden Strahlen, die schnell in den Hauptbrennraum übertreten und diesen in sehr kurzer Zeit (< 1 ms) durchdringen zum Tragen. Sie sorgen für eine Entflammung des Gemisches über den gesamten Brennraum verteilt und erreichen so ein schnelles Durchbrennen (Abbildung 15).

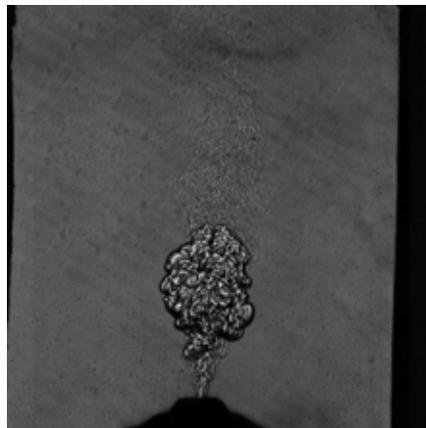


Abbildung 18: Eindringen der brennenden Gas-Jets des Vorkammer-Zündsystems in die Umgebung; gasförmiger Kraftstoff (Methan); im Methan-Wasserstoff-Mischbetrieb stellt reines Methan den schwierigsten Fall für eine Vorkammerzündung dar; auch in diesem Fall wird eine stabile Zündung erreicht.

Außerdem steigt durch den hohen Volumenanteil von Kraftstoff im Gasmotor auch der Zylinderdruck im Brennraum zum Zündzeitpunkt. Besonders bei mageren, d.h. zündunwilligen Gemischen stellt dieser hohe Druck ein Problem für konventionelle Zündkerzen dar, da hier der Zündspannungsbedarf stark steigt. Eine aktive Vorkammer kann durch die gezielte Anreicherung des Gemisches im Bereich der Zündkerze den Spannungsbedarf reduzieren. Gleichzeitig kann auch der Elektrodenabstand der Zündkerze in der Vorkammer geringer gewählt werden.

Der zentrale, das Projekt bearbeitende Mitarbeiter ist Alexander Neubauer (geb. Durst). Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an den Prüfständen und in der Messtechnik haben im Projektjahr 2019 Lukas Weiß und Bastian Lehnert die Arbeiten wesentlich unterstützt.

4 Schlussworte

Das Projekt Speicher B konnte auch im zurückliegenden Jahr bedeutende wissenschaftliche Fortschritte verzeichnen. Das „Speicherhaus“ wurde fertig gestellt und mehrere Demonstrationsanlagen verschiedener Lehrstühle wurden erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Unter anderem die MiniOne-Anlage des CRT steht nun in Nürnberg und soll im kommenden Projektjahr aufschlussreiche Ergebnisse liefern.

Die Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Institut für erneuerbare Energien Erlangen-Nürnberg sowie dem 2019 gegründeten Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) konnte im vergangenen Jahr noch weiter ausgebaut werden. Die gute Vernetzung zeigt, wie hervorragend der Wissenschaftsstandort im Raum Nürnberg-Fürth-Erlangen aufgestellt ist und dass der EnergieCampus Nürnberg dabei eine zentrale Rolle spielt. Bayerns Energie- und Wasserstoffversorgung könnte langfristig auf LOHC-Technologien aufbauen, die maßgeblich am EnergieCampus Nürnberg erforscht wurden.

5 Vorträge & Poster 2020

- [1] K. Mitländer; S. Dürr; D. Stempfle, P. Schühle; P. Preuster; P. Wasserscheid. One-Reactor Konzept für die effiziente Wasserstoffspeicherung in LOHC. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 10.12.2020 (Vortrag)
- [2] J. Bollmann; A. Neubauer; N. Schmidt, L. Zigan; M. Wensing; S. Will. Nutzung der Abgasenthalpie zur Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 10.12.2020 (Vortrag)
- [3] A. Shoshi; E. Schlücker. Further improvements for preheating LOHC from hot compressed hydrogen gas. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 10.12.2020 (Vortrag)
- [4] A. Neubauer; L. Strauß; T. Russwurm; M. Wensing. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) als Speicher regenerativer Energie – effiziente Rückverstromung im BHKW. HYDROGEN DIALOGUE, 2020
- [5] T. Solymosi, P. Preuster, P. Wasserscheid, Dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) in a reactive plate heat exchanger, Jahrestreffen Reaktionstechnik, Würzburg (Poster)

6 Veröffentlichungen 2020

- [6] M. Geißelbrecht, S. Mrusek, K. Müller, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid, “Highly Efficient, Low-Temperature Hydrogen Release from Perhydro-Benzyl Toluene Using Reactive Distillation”, *Energy & Environmental Science* 13 (9), 3119-3128, 2020.
- [7] H. Jorschick, M. Geißelbrecht, M. Eßl, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid. Benzyltoluene/dibenzyltoluene-based mixtures as suitable liquid organic hydrogen carrier systems for low temperature applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (29), 14897-14906, 2020.
- [8] T. Russwurm; A. Peter; L. Weiß; S. Rieß; M. Wensing. Optical investigations on the jet propagation of an actively fuelled Pre-Chamber ignition system, with highspeed schlieren Imaging. THIESEL, 2020
- [9] P. Runge, C. Sölch, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl, V. Grimm. Economic comparison of electric fuels produced at excellent locations for renewable energies: A Scenario for 2035. Working Paper 2020. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3623514>
- [10] A. Bulgarin, H. Jorschick, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid. Purity of hydrogen released from the Liquid Organic Hydrogen Carrier compound perhydro dibenzyltoluene by catalytic dehydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (1), 712-720, 2020.



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854-9120
Fax: +49 911/56854-9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Unterstützt durch:



Gefördert durch:



Impressum

Redaktion/Herausgeber:
Energie Campus Nürnberg

Anschrift:
Energie Campus Nürnberg, Geschäftsstelle
Fürther Str. 250, „Auf AEG“, 90429 Nürnberg
Telefon: 0911 / 56854 9120
Fax: 0911 / 56854 9121
Mail: info@encn.de
www.encn.de

Gestaltung:
Energie Campus Nürnberg
Datenstand: 31.12.2020

© Bildrechte:
EnCN, EnCN/Kurt Fuchs, FAU, TH Nürnberg, Fraunhofer IISB, Fraunhofer IBP,
HS Ansbach, H2B Zentrum Wasserstoff.Bayern, Sachverständigenrat



**ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG**

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854 - 9120
Fax: +49 911/56854 - 9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Gefördert durch:



Bayerische Staatsregierung

Unterstützt durch:



Wirtschaftsreferat