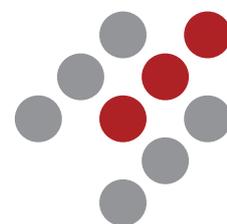


# FORSCHUNGSBERICHT

## 2017 - 2021



ENERGIE  
CAMPUS  
NÜRNBERG

# Vorwort



Der Energie Campus Nürnberg ist eine herausragende Forschungskoope-ration renommierter Hochschulen und Forschungsinstitutionen, die eine Vielzahl an Projekten ge-meinsam erfolgreich abgeschlossen und dabei den wissenschaftlichen Nachwuchs konsequent gefördert hat. Die Komplexität des Energiesektors spiegelt sich dabei in der Breite der Forschungsthemen am EnCN wider. Diese sind regenerative Energieerzeugung, Speicher, Netze, effiziente Energienutzung, Energiemarktdesign und Energiemanage-ment-Technologien. Die eindrucksvollen Ergebnisse sind im

vorliegenden Jahresbericht für die Förderperiode von 2017 bis 2021 zusammengefasst.

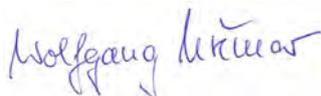
Der Schlüssel zum Erfolg sind die Wissenschaftler\*innen und Studierenden, die interdisziplinär und institutionsübergreifend an der Entwicklung zukunftsweisender Technologien arbeiten. Durch die Bündelung verschiedener Kompetenzen unter einem Dach, besteht die einmalige Möglichkeit, Forschungsthemen ganzheitlich aus verschiedenen Blickrichtungen und Disziplinen zu beleuchten.

Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN hat mit der Wasserstofftechnologie, den effizienten Gebäuden und intelligenten Energiesystemen die künftigen Forschungsschwerpunkte definiert. Dabei handelt es sich um Schlüsseltechnologien zur Umsetzung der Energiewende und Dekarbonisierung des Energiesystems. Die Akteure im EnCN haben auf den genannten Gebieten umfangreiche Expertise und sind bestens ausgerüstet, um die notwendigen Forschungsarbeiten gemeinsam durchzuführen. Durch enge Vernetzung zwischen Forschung und Industriebetrieben wird ein schneller Technologietransfer gelebt.

Am EnCN-Standort „Auf AEG“ haben sich in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Institutionen sowie Lehrstühle der Friedrich-Alexander-Universität und Arbeitsgruppen der Technischen Hochschule Nürnberg angesiedelt. Sie beschäftigen sich mit Energiethemen der Zukunft und mit verwandten Gebieten, die sie über ihre Netzwerke realisieren und dadurch Synergien für gemeinsame Forschung schaffen. Um die Wasserstofftechnologie vorwärts zu bringen und am Markt einzuführen, wurde das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) im EnCN gegründet. Als jüngste Innovation hat die Stadt Nürnberg im Schulterschluss mit Partnern den NKubator als Innovations- und Gründerzentrum für Energie, GreenTech und Nachhaltigkeit „Auf AEG“ eröffnet. Auch die Anzahl der Firmenneugründungen kann sich sehen lassen. Innerhalb der letzten 5 Jahre wurden 10 Start-Up-Unternehmen aus dem direkten Umfeld des EnCN gegründet und fördern mit Neuentwicklungen und Know-how die Energiewende.

Der EnCN wurde in den zurückliegenden 10 Jahren seines Bestehens stetig weiterentwickelt und wirkt heute als Leuchtturm für zukunftsorientierte Forschung in der Metropolregion Nürnberg und ganz Bayern. Mit seiner Ausrüstung, den breiten Kompetenzen und vielen Kooperationspartnern ist er bestens aufgestellt, um den Weg zur klimaneutralen Gesellschaft zu ebnen. Zukünftig wollen wir noch stärker den wissenschaftlichen Nachwuchs in die strategische Ausrichtung des EnCN einbinden, Technologietransfer fördern und Verbundprojekte forcieren. Die einzigartige Aufstellung des EnCN ist dabei Vorbild für zukünftige Forschungsnetzwerke, die mit der heutigen Komplexität der Märkte und Gesellschaft beweist, dass erfolgreiche Forschung besser interdisziplinär und ganzheitlich über Institutsgrenzen hinweg stattfinden sollte. Der EnCN ist eine fest etablierte und weit über die Grenzen Bayerns bekannte Energieforschungsplattform, die nicht mehr wegzudenken ist.

Dezember 2021



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

## Der EnCN auf einen Blick

Der Energie Campus Nürnberg (EnCN) ist ein kooperativer Zusammenschluss von Hochschulen und Forschungsinstituten auf dem Gebiet der Energieforschung. Arbeitsgrundlage des EnCN ist die Vision einer nachhaltigen, vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiewirtschaft. Gemeinsam auf einem Campus, betreiben die Partner am EnCN institutions- und disziplinübergreifende Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien entlang der gesamten Energiekette. Die Forschungsbereiche umfassen insbesondere die Kombination von Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen und Energietransport mit intelligenter Einspeisung und Speicherung, in Verbindung mit einer effizienten Nutzung. Begleitet werden diese Entwicklungen durch Forschung zu Technologien für das Energiemanagement, Energiemarktdesign und Akzeptanz. Um systemverträgliche Technologielösungen und Wege für die Transformation des Energiesystems aufzuzeigen, werden in interdisziplinären Forschungsvorhaben und Projekten die Kompetenzen aus den Ingenieurs-, Natur-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften passgenau kombiniert und eingesetzt. Die Partner des EnCN gehören zur Spitze im Bereich der Energieforschung und bringen ihre internationalen, nationalen und regionalen Netzwerke in die Kooperation ein. Durch ein enges Netzwerk mit den Unternehmen der Metropolregion wird so der Wissens- und Technologietransfer in den Energiesektor befördert und die Innovationskraft der Region gestärkt. Durch zahlreiche Veranstaltungen in Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft ist der EnCN eine Wissens- und Diskussionsplattform für Themen im Bereich der Erneuerbaren Energien und das Schaufenster für die Leistungsfähigkeit der Region in der Energieforschung.

### Forschungsbereiche des EnCN entlang der Energiekette



# Inhaltsverzeichnis

HIGHLIGHTS 2017 - 2021 .....	3
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN .....	21
Organisation des EnCN .....	22
Standort und Netzwerk.....	30
Jahresrückblick 2017 - 2021.....	32
Ausblick 2022.....	50
EnCN GESCHÄFTSSTELLE.....	51
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	63
Projekt Effizienz .....	64
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN .....	166
Lehrstuhl für Leistungselektronik .....	167
W1-Professur „Energieinformatik“ .....	178
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN .....	182
Projekt Energiemarktdesign .....	183
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEN .....	222
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld.....	223
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“ .....	247
FORSCHUNGSBEREICH NETZE .....	260
Projektübersicht Netze .....	261
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER .....	273
Projekt Speicher A – Speicher mit Systemrelevanz bis 2022 .....	274
Projekt Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022 .....	336

# Highlights 2017 - 2021

## Effizienz



### Verbundprojekt KI-Power: Echtzeit-Berechnungsplattform „UltraZohm“ für 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 Open Source Ansatz, wodurch zahlreiche internationale Wissenschaftler einbezogen werden können. Somit vereinfacht und erweitert das UltraZohm-System die Forschung an Regelverfahren für leistungselektronische Systeme und elektrische Antriebe.

>> Effizienz



### MeViSys: Innovative Schwingungsmesstechnik

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts MeViSys hat die TH Nürnberg in innovative Schwingungsmesstechnik investiert. Kern des Systems ist ein 3D-Scanning-Laservibrometer (PSV-500-3D). Mit diesem können flächenhaft und berührungslos experimentelle Modalanalysen durchgeführt und Betriebsschwingformen ermittelt werden. Durch die Kombination mit den Maschinenprüfständen des Institut ELSYS am EnCN können die Schwingungs- und Geräuscheigenschaften von Maschinen bestimmt und optimiert werden.

>> Effizienz



### Mehrphasenmaschinen

Zur messtechnischen Verifikation der entwickelten Berechnungsmodelle mehrsträngiger Maschinen wurde ein Prototyp mit einer Strangzahl von  $m = 2 \cdot 3$  ausgelegt und gefertigt. Für den drehzahlvariablen Betrieb wurde ein sechsphasiger Spannungszwischenkreisumrichter entwickelt und aufgebaut. Dieser ermöglicht nicht nur Standard-Modulationsverfahren, sondern auch die für hohe Aussteuergrade besonders vorteilhaften optimierten diskontinuierlichen Modulationen. Durch die Messungen am EnCN-Motorprüfstand wurden die Berechnungsmodelle eindrucksvoll bestätigt.

>> Effizienz



### Mit einem digitalen Produktionsabbild zu mehr Energieeffizienz

In einem Pilotprojekt mit dem Kooperationspartner pressmetall Gunzenhausen GmbH wurde vom Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz (KIEff) eine Software zur Visualisierung von Produktionskennzahlen entwickelt. Diese ermöglicht in beispielhafter Weise das Überwachen und Nachsteuern des Produktionsprozesses. Als Resultat werden die Liefertreue und die Energieeffizienz der produzierenden Druckgussmaschinen verbessert. Die erstmals digital zur Verfügung stehenden Produktionsdaten ermöglichen den Einsatz von Data Analytics-Methoden.

>> Effizienz



### Verbundprojekt DNaguss: Durchgängige numerische Auslegung von Gussteilen

Der Start des Verbundprojektes im Rahmen des 7. Energieforschungsprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter der Projektleitung des Fraunhofer LBF erfolgte im November 2019. Ziel ist es, den Auslegungsprozess von Großgussteilen, insbesondere in der Windkraftindustrie, durch Kopplung der genutzten Auslegungstools zu optimieren. Das Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEff) ist im Projekt für Konzeption und Realisierung der Schnittstellen verantwortlich.

>> Effizienz



### Fachtagung Digitalisierung in der Gießereiindustrie

Am 9. und 10. Oktober 2019 beleuchteten auf der vom Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEff) veranstalteten zweitägigen Tagung unter der Leitung von Prof. Dr. Wolfgang Schlüter Experten aus Industrie und Wissenschaft unterschiedliche Aspekte der Digitalisierung unter dem Motto „Keine Angst vor Digitalisierung“. Vorgestellt wurden unter anderem das am Energie Campus Nürnberg entwickelte und bei der Firma pressmetall Gunzenhausen GmbH im Einsatz befindliche Prozess Monitoring System.

>> Effizienz



### Online-Demonstrator zur Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

Das Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz (KIEff) hat im Rahmen des Green Factory Bavaria-Forschungsverbundes eine frei konfigurierbare Simulation des Betriebsablaufs eines Aluminium-Druckgussbetriebes entwickelt, mit der sich für verschiedene vorgegebene Betriebsgrößen die Auswirkung intralogistischer Maßnahmen auf Produktivität und Energieverbrauch simulieren lassen. Mit Hilfe eines Online-Demonstrators (frei verfügbar unter <https://www.hs-ansbach.de/emelt>) lassen sich Energieeffizienzmaßnahmen für 3 verschiedene Betriebsgrößen untersuchen.

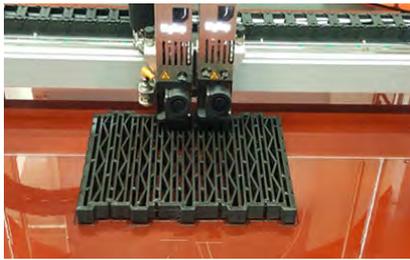
>> Effizienz



### Einfluss der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik

Durch den Ausbrand quaderförmiger, sphärischer und zylindrischer Porosierungsmittel werden im Ziegel geometrisch geformte Poren unterschiedlicher Geometrien, aber mit stets konstantem Einzelporenvolumen erzeugt. Die zylinderförmigen Porosierungsmittel verursachen bei der Formgebung eine longitudinale Vorzugsorientierung in Fließrichtung des Tons. Daraus resultiert bei senkrecht zur Zylinderachse verlaufendem Wärmestrom die stärkste Absenkung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit um 27 %. Dieser Effekt kann zur weiteren Verbesserung der Wärmedämmung von Mauerziegeln genutzt werden.

>> Effizienz



#### Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutz-Eigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping

Mittels FEM-Simulationen erfolgt die Optimierung von Mauerziegeln mit verbesserten Schallschutz- und Wärmedämm-Eigenschaften. Durch einen nachgeschalteten 3D-Druck werden „Ersatzziegel“ aus Polymilchsäure additiv gefertigt und können im Wärmeprüfstand untersucht werden. Eine Optimierung der Ziegel-Lochbild-Geometrie führt zu einer Verbesserung der Schallschutz-Eigenschaften um ca. 1,4 dB. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der Mauerziegel, d.h. die Wärmedämmeigenschaften, erhalten bleiben.

>> Effizienz



#### Absenkung der Wärmeübertragung durch Strahlung in Hochlochziegeln

Durch eine Infrarot-Reflex-Beschichtung der Oberflächen im inneren Lochbild von Hochlochziegeln wird der Strahlungsanteil an der Wärmeübertragung um 79 % abgesenkt. Da die Beschichtung nur die Flächeneigenschaften der Ziegelkeramik verändert, bleiben die Volumeneigenschaften des Ziegels unbeeinflusst und andere werkstofftechnische Kenngrößen, wie z.B. Rohdichte, Druckfestigkeit und Schalldämm-Maß, bleiben erhalten. Die durch Beschichtung verbesserte Wärmedämmung beträgt je nach Lochmuster zwischen 10 bis 27 %.

>> Effizienz



#### Höchste Wärmedämmung durch Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogel-Monolithe

Um die Wärmedämmung von Gebäuden zu verbessern, wurden neuartige Silica-Aerogel-Monolithe synthetisiert und mit Polystyrol-Nanofasern verstärkt. Die Nanofasern werden aus verbrauchten und recycelten Styroporplatten hergestellt, die in großer Menge bei Gebäudesanierungen anfallen. Durch Weiterentwicklung des Aerogel-Synthesewegs sowie Optimierung der Trocknungsparameter gelingt erstmals die Herstellung mechanisch stabiler, monolithischer Aerogele, die sich durch äußerst geringe Wärmeleitfähigkeiten von nur  $\lambda = 0,020 \text{ W}/(\text{mK})$  auszeichnen.

>> Effizienz



#### EU-Projekt "LightCoc" (HORIZON 2020): Aufbau einer Labor-Infrastruktur für das Up-Scaling leichtgewichtiger keramischer Materialien und ihrer Strukturen

Ziel der Arbeitsgruppe im EnCN ist die Entwicklung neuer Leichtgewicht-Hochlochziegel mit verbesserten werkstofftechnischen Eigenschaften. Dafür werden neuartige, innovative Porosierungsmittel eingesetzt, um möglichst feinteilige Porengrößen innerhalb der Ziegelkeramik zu generieren. Die Zugabe von Carbon Black führt zur Ausbildung von „schwarzen Kernen“ in der Ziegelkeramik. Erst durch Zugabe eines Porosierungsmittels, das in der Ziegelmatrix eine diffusionsoffene Porenstruktur hinterlässt, kann das Carbon Black ausgebrannt werden. Die resultierende Mischporosierung aus Kanal- und Nanoporen bewirkt eine zusätzliche Abnahme der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens unter den Zielwert von  $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W}/(\text{mK})$ . Im Rahmen des Vorhabens erfolgt außerdem der Aufbau einer Pilotanlage für die Herstellung von Laborziegeln im Technikumsmaßstab.

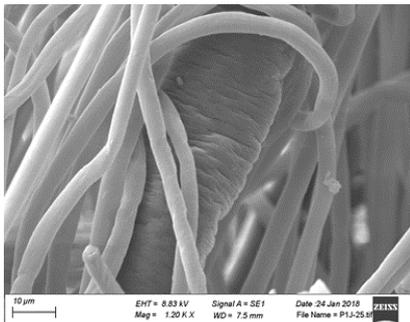
>> Effizienz



### EU-Projekt „Hypobrick“ (LIFE): Aufbruch zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft - Entwicklung ungebrannter Baustoffe auf der Basis von Reststoffen

Ziel ist die Entwicklung neuer, „ungebrannter“ Mauersteine - basierend auf industriellen Reststoffen über die sogenannte Geopolymer-Route. Bei den Geopolymeren handelt es sich um „kalt erhärtende“ Bindebaustoff-Systeme, die zur Verfestigung nicht gebrannt werden müssen. In der Arbeitsgruppe im EnCN werden geeignete Rezepturen sowohl für die Gießformgebung als auch für die Extrusion ausgearbeitet. Die beteiligten Ziegelwerke übernehmen die Rezepturen und führen Großversuche in der Produktion durch. Dabei wird der Tunnelofen-Brennprozess eingespart.

>> Effizienz



### Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien

Im Projekt „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ erfolgt die Entwicklung neuartiger Dämmstoffe aus nanoskaligen Polystyrol-Fasern. Diese werden von einem Projektpartner an der Freien Universität Berlin durch Elektrospinning hergestellt. Dazu werden Alt-Styropormengen aus dem Baustoff-Recycling verflüssigt und zu Nanofasern und Nanofaser-Vliesen versponnen. Im EnCN werden die Nanofasern in Wandbaustoffe integriert mit dem Ziel, deren Wärmedämmeigenschaften zu verbessern. Mit den neuentwickelten Nanofasern werden die Massivwandbaustoffe Ziegel, Kalksandstein, Dünnbettmörtel, Wärmedämmputz, Porenbeton sowie ein Geopolymer wärmetechnisch optimiert.

>> Effizienz



### Verbesserung der Wärmedämmung von Portlandzement-Produkten durch Wasserstoff-Porosierung

Gegenstand der Arbeiten ist das Aufschäumen portlandzementhaltiger Kompositen durch Wasserstoff. Das Gas wird über die chemische Reaktion feinteiliger Metallpulver mit dem alkalischen Zementleim gebildet. Bereits geringe Mengen an geeigneten Metallpulvern führen zu einer deutlichen Abnahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und damit zu einer Verbesserung der Wärmedämmung.

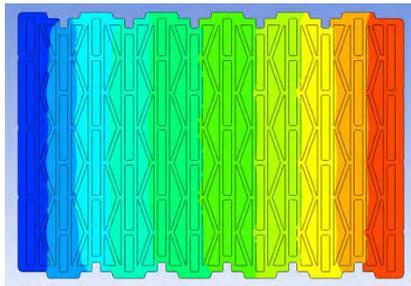
>> Effizienz



### Entwicklung neuartiger Gipschaumstoffe für Schallschutz- und Wärmeschutz-Elemente

Funktionale Bauelemente für Innenräume sorgen durch eine hohe Schall- und Wärmedämmung sowie verbesserte Brandschutzeigenschaften nicht nur für ein erhöhtes Wohlbefinden, sondern gleichzeitig für mehr Sicherheit im Brandfall. Die Schaumbauteile basieren auf Polyharnstoff und Gips. Die Zugabe von Füllstoffen aus unterschiedlichen Werkstoffklassen erlaubt eine zielgenaue Einstellung der Performance.

>> 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



### Fassade<sup>3</sup>: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes

Im gemeinsamen BMWi-Projekt „Fassade<sup>3</sup>“ 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

## Energiemanagement-Technologien



### Sustainability of Hybrid-Electric Aircraft System Architectures

GENESIS ist ein Projekt im Rahmen des Clean Sky Programms der Europäischen Union. Neun Partner aus sechs Ländern bilden ein fachübergreifend aufgestelltes Konsortium mit dem Ziel, einen Technologie- und Nachhaltigkeitsfahrplan zu entwickeln, um die Ambitionen der europäischen Luftfahrtindustrie für den Übergang zu umweltverträglichen und wettbewerbsfähigen elektrischen und hybriden Flugzeugsystemen zu unterstützen.

>> EMT

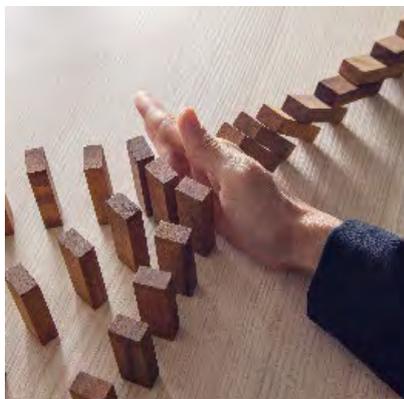


### Highly efficient and trustworthy components and systems for the next-generation energy supply infrastructure

PROGRESSUS ist ein EU-Projekt mit 22 Partnern aus fünf Ländern und einem Projektvolumen von 20 Mio. Euro. Zur Unterstützung der europäischen Klimaziele 2030 zielt PROGRESSUS darauf ab, ein Smart Grid der nächsten Generation einzuführen, das am Anwendungsbeispiel einer intelligenten Ladeinfrastruktur demonstriert wird, wie sich diese nahtlos in aktuelle Smart-Grid-Architekturkonzepte einfügen lässt. Insbesondere der hohe Leistungsbedarf von Ultra-Schnellladestationen stellt in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung dar.

>> 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 CO<sub>2</sub>-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 können. Die Stromgestehungskosten erneuerbarer Technologien sind in den letzten Jahren deutlich gesunken, variieren global aber sehr stark. Im Teilprojekt Speicher B des EnCN werden daher mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, 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. Bislang 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

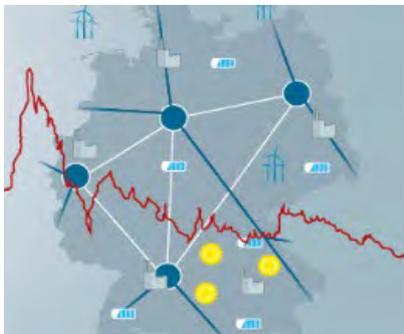


© Shutterstock 1056930098

### Modellierung von Entry-Exit Gasmärkten

Um den Gashandel vom Engpassmanagement zu entkoppeln, wurde in Europa das Entry-Exit System des Gashandels etabliert, das den Netzbetreiber verpflichtet, an Ein- und Ausspeiseknoten technische Kapazitäten festzulegen. Unternehmen buchen diese Kapazitäten langfristig und können dann täglich an den entsprechenden Knoten bis zur gebuchten Kapazität Gas einspeisen oder entnehmen. In diesem Projekt wurde erstmals ein Modell des Entry-Exit Gashandels entwickelt, das es erlaubt, das Zusammenspiel der technischen Entscheidungen des Netzbetreibers und der Entscheidungen im Gashandel zu analysieren. Zusätzlich wurden erste Methoden zum Lösen dieses mathematisch anspruchsvollen mehrstufigen Problems für Gastransport entwickelt. Hierbei spielten die entwickelten Methoden für die Buchungsvalidierung im europäischen Entry-Exit Gasmarkt eine wichtige Rolle.

&gt;&gt; EMD



### Marktdesignanalysen mit dem GATE-Modell

Das „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Modell erlaubt es, die Auswirkungen von Anpassungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen auf Investitionen in Netz und Erzeugungskapazitäten im Stromsektor zu analysieren. Kalibriert auf Szenarien des Netzentwicklungsplans für das Jahr 2035 wird der regionale und lastnahe Zubau von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten durch geeignete Ausschreibungsformate, die Einführung mehrerer Preiszonen in Deutschland sowie die systemdienliche Abregelung von erneuerbaren Energien analysiert. Einige Maßnahmen führen zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und zu Einsparungen beim Netzausbau.

&gt;&gt; EMD



© Shutterstock 367363487

### Regionale Investitionen unter Berücksichtigung von Nachbarmärkten

Nationale Entscheidungen zum Ausbau von Netz- oder Erzeugungskapazitäten sind im europäischen Strommarkt hochgradig interdependent. Aus Sicht einer Kernregion werden daher regionale Ausbauentscheidungen in einem integrierten Strommarkt untersucht. Die Kernregion kann über Technologiemix, die regionale Verteilung der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten sowie den Stromnetzausbau entscheiden. Dabei werden Interdependenzen mit Nachbarmärkten einbezogen, die über den Spotmarkt und durch marktgetriebene Kraftwerksinvestitionen erfolgen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Berücksichtigung des Gesamtsystems die regionale Planung verbessern, aber auch zum Beispiel Einfluss auf die regionale Verteilung von Kapazitäten haben kann.

&gt;&gt; EMD



© Shutterstock 131120717

### Theoretische Analyse und Modellierung der Marktintegration von Speichern

Speicher im Strommarkt führen zu einer Kopplung einzelner Handelsperioden. Das Projekt zeigt, dass hierdurch mehrere Marktgleichgewichte entstehen können. Zusätzlich werden hinreichende Bedingungen hergeleitet, die Eindeutigkeit von Erzeugung und Nachfrage garantieren. Da die Berechnungszeit von Marktgleichgewichten durch Speicher stark ansteigt, wird ein parallelisierter Algorithmus entwickelt, mit dem Spotmarktgleichgewichte über viele Handelsperioden effizient berechnet werden können.

&gt;&gt; EMD



@ Shutterstock 407604208

### Design flexibler Stromversorgungstarife für Prosumer

Viele Haushalte verfügen heute über eigene Stromproduktionsanlagen kombiniert mit Energiespeichern und beziehen nur zur Deckung des Fehlbedarfs ihren Strom aus dem Versorgungsnetz. In dem Projekt werden verschiedene flexible Stromtarife betrachtet, die Prosumer dazu bewegen sollen, ihre Anlagen stärker systemdienlich zu betreiben. Der Stromversorger antizipiert für die Festlegung der flexiblen Tarif-komponenten jeweils das Verhalten des Prosumers. Alle Tarifbedingungen müssen für Prosumer jeweils mindestens so attraktiv sein, wie ein auf dem Markt üblicherweise angebotener Fixpreistarif. Mit mehrstufigen Modellen werden Aussagen zu tarifinduzierten Verhaltensänderungen des Prosumers getroffen sowie zur möglichen Marge des Stromversorgers.

>> EMD



© Shutterstock 709023433

### Robuste Marktgleichgewichte im Strommarkt

Für die Analyse des Strommarkts sind theoretische Erkenntnisse über das Marktgeschehen wichtig. Dies führt zu dem mathematischen Studium von Gleichgewichtsproblemen. Im Projekt werden Unsicherheiten auf der Nachfrageseite in der theoretischen Untersuchung integriert, da beispielsweise die Stromnachfrage in der Zukunft nur auf Schätzungen beruht. Hierbei ist das Ziel, die Fragestellung gegenüber Unsicherheiten abzusichern. Das bedeutet, dass das ermittelte Marktgleichgewicht für gewisse Schwankungen in den Nachfragen immer noch eine Lösung des Marktgeschehens ist. Diese theoretischen Untersuchungen sind wichtig, um herauszufinden, wie man Marktgleichgewichte unter derartigen Unsicherheiten effizient berechnen kann.

>> EMD



### Endogene Preiszonen im Strommarkt

Wenn ein Marktgebiet beim Stromhandel nur in wenige Preiszonen unterteilt werden kann, wie sollten die Zonen in einem Netzwerk dann konfiguriert werden, um Investitions- und Produktionsentscheidungen langfristig optimal zu steuern? Dies wird mithilfe des mehrstufigen EnCN-Strommarktmodells untersucht, indem die wohlfahrtsoptimale Zonierung für einen gegebenen Markt endogen bestimmt wird. Eine Anwendung auf den deutschen Strommarkt zeigt, dass bereits die Implementierung einer kleinen Anzahl an optimal konfigurierten Preiszonen zu erheblichen Wohlfahrtsgewinnen führen kann, wobei die Höhe der interzonalen Übertragungskapazitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Marktergebnisse hat.

>> EMD

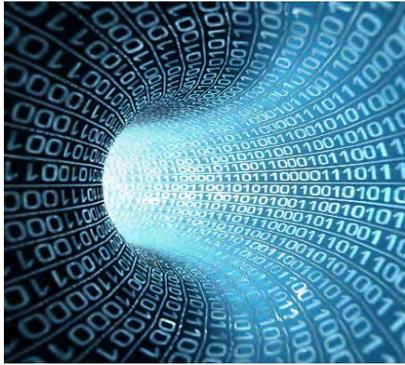


© Shutterstock 133014653

### Flexible Verbraucher im deutschen Strommarkt

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Flexible Verbraucher“ wird mithilfe des EnCN-Strommarktmodells die Rolle flexibler industrieller Verbraucher im Strommarkt untersucht. Es zeigt sich, dass ein flexibler Stromverbrauch durch die Industrie nicht nur zu deutlich geringeren Stromkosten für flexible Konsumenten führt, sondern auch zu einem reduzierten Bedarf an Netzausbau. Um diese Effekte zu erzielen, sind regionale Anreize von besonderer Wichtigkeit.

>> EMD

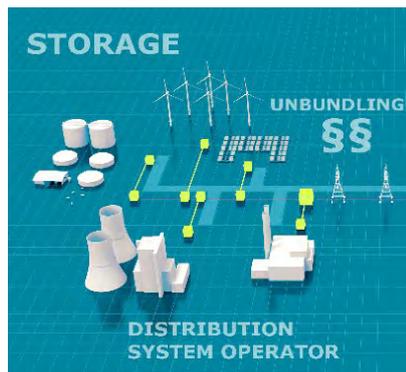


© Shutterstock 9623992

### Robuste Durchmesserauswahl für Pipelinenetzwerke

Beim Lösen von Optimierungsproblemen für den Netzausbau sollen Unsicherheiten berücksichtigt werden, damit zukünftige Netze auch bei Abweichungen der zugrundeliegenden Prognosen den veränderten Anforderungen genügen. In dem Projekt wird mit Hilfe einer neuen mathematischen Methode (Robuste Optimierung) für eine Vielzahl zukünftiger Bedarfsszenarien der robuste Durchmesser für Pipeline-Netzwerke ohne Kreise am Beispiel eines Wasserstoffnetzes berechnet.

>> EMD



### Speicherbetrieb und Entflechtung auf Verteilernetzebene

Es werden Vertrags- und Ausschreibungsszenarien untersucht, die es dem Verteilnetzbetreiber ermöglichen, in den rein gewinn-maximierenden Speicherbetrieb von privaten Betreibern einzugreifen, um Kosten beim Netzausbau und der Netzbewirtschaftung zu reduzieren. Im Zentrum steht die rechtliche Umsetzbarkeit der Szenarien. Dabei muss insbesondere auf das Entflechtungsregime, d.h. die Trennung von Markt- und Netzsphäre, geachtet werden. Diese Trennung wird zukünftig nach dem Änderungsvorschlag der Europäischen Kommission zur Elektrizitäts-binnenmarkt-Richtlinie weiteren Verschärfungen unterliegen.

>> EMD

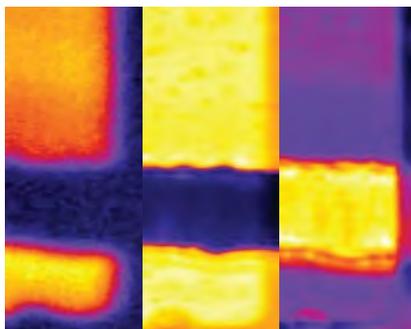


### Governance-Struktur bei Pilotprojekten

Der Markteinführung technologischer Innovationen im Rahmen der Energiewende gehen oft Pilotprojekte im Feld voraus, in denen technische Systemkompatibilität, Geschäftsmodelle von Unternehmen und Akzeptanz durch die Nutzer getestet werden. Immer stärkere Interdependenzen im Energiesystem erfordern die Einbettung dieser Projekte in eine Quadruple Helix aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft. In experimentellen Studien wurde untersucht, wie sich die organisationale Einbettung eines Pilotprojekts auf die Wahrnehmung von Innovationen auswirkt und welche Facetten von Pilotprojekten eine hohe Attraktivität für Kunden und Nutzergruppen implizieren.

>> EMD

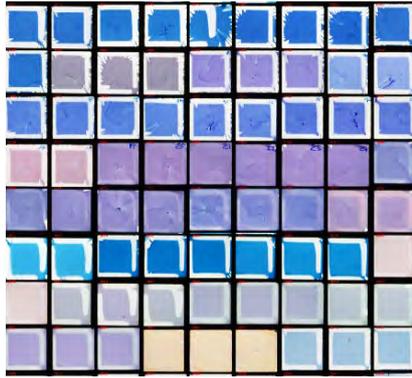
## Erneuerbare Energien



### Defektanalyse in Tandem Solarzellen

Innerhalb des EnCN wurden während der letzten Jahre effektive Methoden zur Charakterisierung organischer Halbleiterschichten für die Photovoltaik entwickelt. Insbesondere die Kombination von Elektrolumineszenz, Photolumineszenz und Thermographie ermöglicht eine detaillierte Defektanalyse an komplexen Tandem Solarzellen, die aus bis zu zehn Schichten bestehen. Hierbei kann durch Vergleich der Daten aus verschiedenen Messungen die vertikale Position des Defekts im Schichtstapel exakt ermittelt werden.

>> Erneuerbare Energien



### Maschinelles Lernen zur Vorhersage von Bauteileigenschaften

Die starke Expertise innerhalb der zerstörungsfreien Analyse mit optischen Methoden wie Photolumineszenz und Absorption konnte insbesondere bei spektral aufgelösten Messungen an kombinatorischen Experimenten mit hunderten Proben eingesetzt werden. Durch Feature-basierte Datenauswertung und den Einsatz von Machine Learning gelang eine Vorhersage der Effizienz und Stabilität von Solarzellen. Zeitaufgelöste Photolumineszenz-Messungen ermöglichten zudem ein tiefes Verständnis der Bauteil-Photophysik.

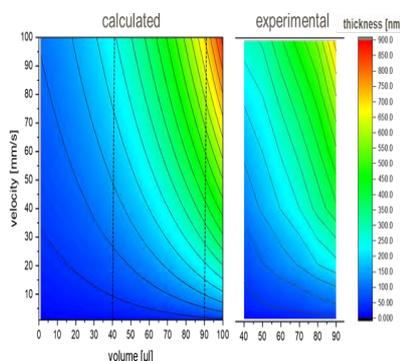
>> Erneuerbare Energien



### Gedruckte Photovoltaik eröffnet neue Möglichkeiten für die energetische Aktivierung von Gebäudefassaden

Die einzigartigen Eigenschaften der gedruckten Photovoltaik (PV) - Flexibilität, Semitransparenz, geringes Gewicht, beliebige Farben und Formen – ermöglichen die energetische Aktivierung von Fassadenflächen, für die herkömmliche PV nicht geeignet ist. Insbesondere Beschattungselemente, unentbehrlich in Bürogebäuden, profitieren von den gestalterischen Möglichkeiten der gedruckten PV. Im Projekt EET wurde die Produktion gedruckter Solarmodule aufskaliert, ihre Effizienz, Lebensdauer und Ästhetik verbessert sowie ihre Praxistauglichkeit durch Integration in Wohn- und Bürogebäude demonstriert.

>> Erneuerbare Energien



### Verbesserte Herstellungsprozesse für gedruckte Solarmodule durch numerische Simulationen

Leistung, Lebensdauer und Lichtdurchlässigkeit gedruckter Solarmodule hängen entscheidend von der Qualität der einzelnen Schichten ab. Ein häufig angewandtes Beschichtungsverfahren ist das Rakeln. Bei kleinen Solarzellen resultieren homogene Schichten, bei großflächigen Modulen zeigt sich ein Schichtdickengradient. Um homogene Schichten zu erhalten, wurde ein Rakelgerät mit programmierbarem Geschwindigkeitsprofil gebaut. Das Geschwindigkeitsprofil ergibt sich aus numerischen Simulationen des Prozesses auf der Basis eines empirischen Modells.

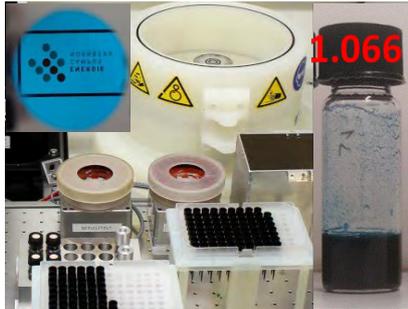
>> Erneuerbare Energien



### Metalloxid Nanokristalltinten für schaltbare Fenster

Schaltbare Fenster basieren auf „elektrochromen“ Materialien, die mit verschiedenen Verfahren hergestellt werden können. Im Projekt EET wurden druckbare Tinten hergestellt, die nach dem Aufdrucken in dünnen Filmen die gewünschten Effekte nicht nur im Sichtbaren, sondern im Speziellen auch im infraroten Spektralbereich zeigen, um auch den Eintrag von Wärmestrahlung steuern zu können. Bei den Tinten wurde besonders darauf geachtet, auf wertvolle und deshalb beschränkt vorhandene Metalle zu verzichten.

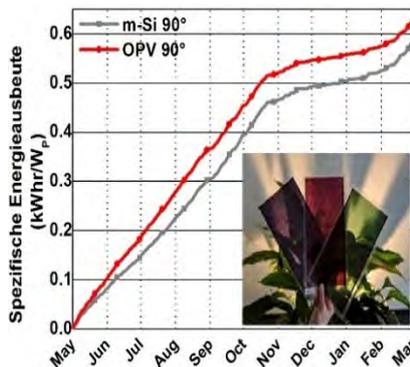
>> Erneuerbare Energien



### 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.

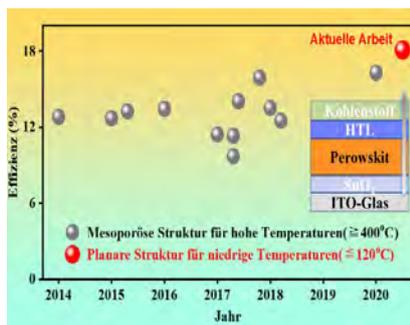
>> Erneuerbare Energien



### 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 Wp 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.

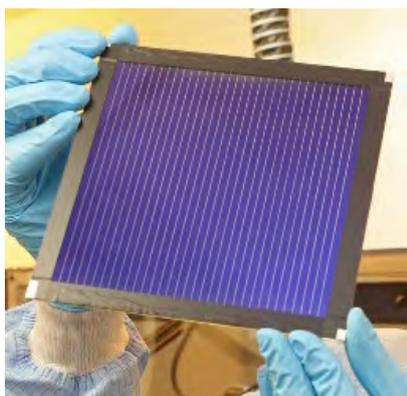
>> Erneuerbare Energien



### 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-Beschichtungs-technologien“ 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.

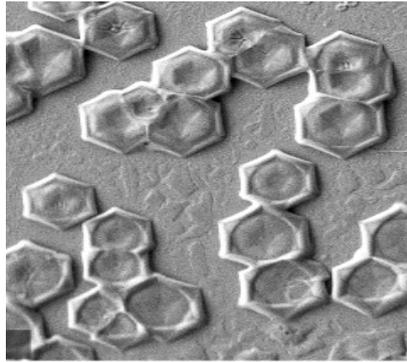
>> Erneuerbare Energien



### Organische Photovoltaik (OPV)-Module mit Weltrekord-Effizienz

In der „Solarfabrik der Zukunft“ wurden organische Solarmodule mit Effizienzen oberhalb der psychologisch wichtigen Marke von 10% entwickelt. Die vom Fraunhofer ISE zertifizierten Effizienzen von 12,6% und 11,7% für Module mit Flächen von 26 cm<sup>2</sup> bzw. 204 cm<sup>2</sup> stellen Weltrekorde für organische Photovoltaik dar. Dies zeigt, dass die OPV-Technologie das Potential hat, auch im industriell relevanten Maßstab zu anderen Dünnschicht PV-Technologien aufzuschließen.

>> Erneuerbare Energien



### Atomar geordnete Strukturen aus dem Tintenstrahldrucker

Halbleiter mit höchster Qualität, so wie sie in hochwertigen elektronischen Bauelementen verwendet werden, erfordern epitaktisches (atomar geordnetes) Wachstum auf einem kristallinen Substrat. Während solch präzises Wachstum üblicherweise in Hochvakuumanlagen durch zeit-aufwendiges Abscheiden atomar dünner Schichten bewerkstelligt wird, wurde es von uns mit einem einfachen Tintenstrahldrucker erzielt. Der Schlüssel dazu ist eine Kombination aus ionischen Halbleitern und geeigneten Substraten zu finden, die perfekt zueinander passen und an Luft prozessiert werden können.

[>> Erneuerbare Energien](#)

## Netze



### Zentrum für angewandte Simulation

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

[>> 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 herschalten?

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](#)



### Kopernikus ENSURE Phase II

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](#)



### Demonstrationsanlage *hybrides Energiespeichernetz* am EnCN

Das hybride Energiespeichernetz ENGiNe ist ein Demonstrator auf dem Gebiet der Netzintegration dezentraler regenerativer Energieanlagen und Speicher. Er dient der Untersuchung des Netzverhaltens unterschiedlicher Speichertechnologien sowie deren sinnvolle Kombination (Hybridspeicher) im netzgekoppelten Betrieb und im Inselnetz.

[>> Netze](#)



### Forschung an elektrischen Energiesystemen mit dem leistungsstärksten Echtzeitsimulator Europas

Am 29. März 2019 wurde am Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) der nach Herstellerangaben (RTDS Technologies Inc.) leistungsstärkste Echtzeitsimulator Europas im akademischen Bereich in Betrieb genommen. Einsatzbereiche sind Tests für die Entwicklung von Schutzsystemen, die Prüfung von Energiespeichersystemen sowie Forschung im Bereich der Netzintegration von HGÜ- und FACTS. Das Echtzeitlabor wird als innovatives Instrument zur Durchführung hochqualifizierter, praktischer und nachhaltiger Forschung zum Thema elektrische Energiesysteme eingesetzt.

[>> Netze](#)

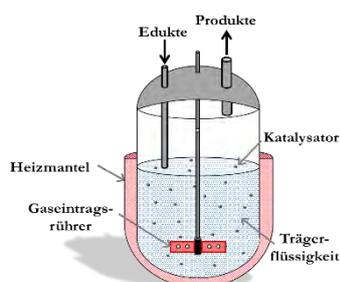


### Erfolgreicher Projektabschluss NETZ:KRAFT

Schutzsysteme dienen neben der Wahrung der Integrität des Energieversorgungssystems und der Abwendung großer Sachschäden auch dem Schutz von Menschenleben. Im Projekt NETZ:KRAFT wurde erfolgreich eine Analyse, Bewertung und Optimierung von Schutzsystemen während des Netzwiederaufbaus vorgenommen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden einerseits zur Neu- und Weiterentwicklung unterschiedlicher Schutzfunktionen eingesetzt. Darüber hinaus lassen sich aus den Bewertungsergebnissen konkrete Handlungsempfehlungen im Hinblick auf die Schutzkonzepterstellung und die Entwicklung von Netzwiederaufbaustrategien entwickeln.

[>> Netze](#)

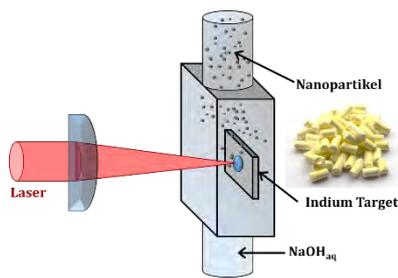
## Speicher



### Innovatives Slurry-Reaktorkonzept für Power-to-Methanol

Der Einsatz von Slurry-Reaktoren für die erneuerbare Synthese des Energiespeichers Methanol ermöglicht eine verbesserte Temperaturkontrolle des exothermen dynamischen Prozesses. Gesteigerte Methanolausbeuten konnten im Slurry-System durch die reaktionstechnische Optimierung dieses vielversprechenden Prozesskonzepts erreicht werden. Ein untersuchtes robustes Katalysatorsystem macht den stabilen Langzeitbetrieb möglich.

[>> Speicher](#)



### Laserbasierte Herstellung von Methanolsynthesekatalysatoren

Die Synthese effizienter Indiumoxid-basierter Katalysatoren für die Power-to-Methanol Technologie gelingt durch das Verfahren der gepulsten Laserablation in Flüssigkeiten. Durch eine optimierte Kontrolle der Laserparameter können chemisch-morphologische Eigenschaften beeinflusst und damit die Aktivität der Katalysatoren gesteigert werden. Die projektübergreifende Kooperation des EnCN mit dem Lehrstuhl für Technische Chemie I der Universität Duisburg-Essen eröffnet neue Wege für die effiziente Wasserstoffspeicherung in Methanol.

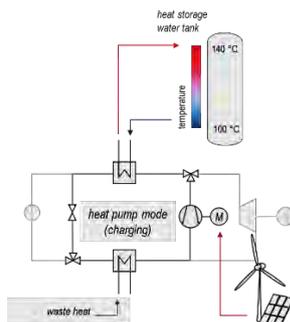
[>> Speicher](#)



### Inbetriebnahme HP-ORC-Anlage mit thermischem Speicher

Basierend auf der Wärmepumpen- und ORC-Technologie entsteht am EnCN ein innovativer elektrischer Energiespeicher. In Verbindung mit einem sensiblen thermischen Speicher wird daraus ein gut skalierbares Speichersystem für die Energiewende. Nach einer mehrjährigen intensiven Entwicklungsphase folgte 2020 die Inbetriebnahme. In der Pilotanlage soll der tägliche Ein- und Ausspeicherprozess von fluktuierenden Lasten in einer Leistungsgrößenordnung von 20 kW untersucht werden.

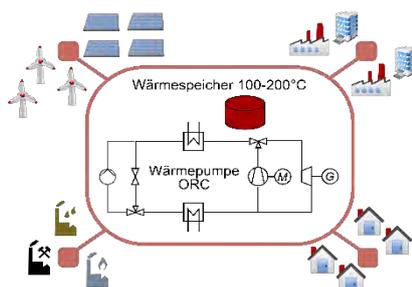
[>> Speicher](#)



### Machbarkeitsstudie zum Einsatz der reversiblen ORC-Technologie

Die Integration der reversiblen ORC-Technologie in bestehende Netze als Speicher eigenerzeugter regenerativer Energie stellt vor allem in Hinsicht auf steigende Strompreise und sinkende Einspeisevergütungen eine technische und wirtschaftlich attraktive Lösung dar. Zudem kann der Autarkiegrad einzelner Versorgungsnetze durch den Einsatz der Technologie zunehmend erhöht werden. Eine Optimierung der Anlagengröße kann basierend auf der entwickelten Modellierung verbraucherstrukturspezifisch erfolgen.

[>> Speicher](#)



### Simulation zur Analyse von HP-ORC-Speicher-Systemen

Die Simulationsbibliothek i7-AnyEnergy wurde erfolgreich um thermische Komponenten erweitert. Damit stehen ein komplexes Schichtmodell zur Abbildung von Wärmespeichern und ihrer inneren Temperaturverteilung, sowie Modelle für die Abbildung von Wärmepumpen und ORCs inklusive Teillastverhalten zur Verfügung. Mithilfe dieser Modelle ist es möglich, die in Speicher A realisierte Pilotanlage detailgetreu abzubilden und wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten zu finden.

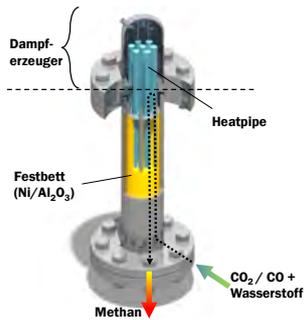
[>> Speicher](#)



### Sensibler Heißwasserspeicher als Wärmespeicher für die Carnot Batterie

Die Carnotbatterie bietet die Möglichkeit, elektrische Energie in Wärme zu speichern und anschließend wieder in das elektrische Netz einzuspeisen. Der Wärmespeicher kann darüber hinaus aber auch zur Koppelung von Wärme- und elektrischem Netz genutzt werden. Am EnCN wurde der errichtete Speicher mit 8 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen erfolgreich in Betrieb genommen. Damit ist es möglich, die spezifischen Eigenschaften der Carnot Batterie anhand einer innovativen Pilotanlage zu erforschen.

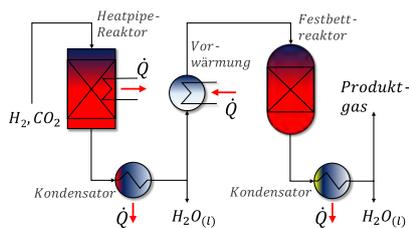
[>> Speicher](#)



### Heatpipe-gekühltes Reaktorkonzept

Bei der katalytischen Methanisierung von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff werden große Wärmemengen frei. Um eine Deaktivierung des Katalysators durch Sinterprozesse zu verhindern, ist eine effektive Wärmeabfuhr erforderlich. Der Einsatz von Heatpipes zur Kühlung des Festbetts bietet die Abfuhr der Reaktionswärme mit extrem hohen Leistungsdichten auf engstem Raum. Dadurch kann die Deaktivierung durch Sintern zuverlässig vermieden und ein Langzeitbetrieb gewährleistet werden.

>> Speicher



### Reaktorsystem zur dynamische Methanisierung

Der dynamische Betrieb der katalytischen Methanisierung ist eine Voraussetzung dafür, die schwankende Bereitstellung von grünem Wasserstoff aus fluktuierenden erneuerbaren Energien ohne Zwischenspeicher umzusetzen. Ein zweistufiges Reaktorsystems mit Zwischenkondensation ermöglicht hierbei einen hervorragenden Teillastbetrieb mit gleichbleibend hoher Produktgasqualität und Lastwechsel mit bis zu 10 % der Vollast pro Minute.

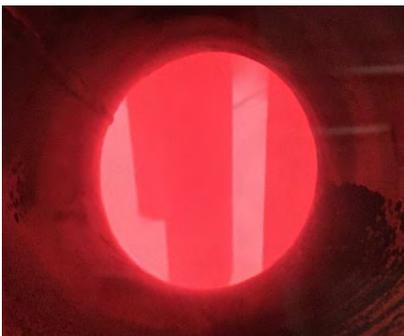
>> Speicher



### Zyklische Kalzinierung und Karbonisierung im Labor-Carbonatspeicher

Der Labor-Carbonatspeicher am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik ist auf zyklische Be- und Entladung mittels Kalzinierung und Karbonisierung ausgelegt. Eine Beheizung bis 10 kW ermöglicht Kalzinierungstemperaturen bis 900 °C. Für die Karbonisierung ist eine maximale Wärmefreisetzung von 5 kW möglich, wovon bis zu 2,5 kW durch die zentral geführte Heatpipe in den Dampferzeuger übertragen werden können. Die Speicherkapazität von 15 kWh ermöglicht vollständige Zyklen innerhalb eines Versuchstages und damit eine hohe Anzahl an Versuchen zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von isothermen Carbonatspeichern.

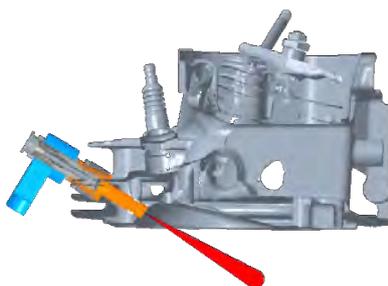
>> Speicher



### 250 kWh Carbonatspeicher mit 30 kW dynamischer Dampferzeugung

Die Pilotanlage im 250 kWh Maßstab im Speicherhaus des EnCN wurde erfolgreich in Betrieb genommen und der Proof-of-Concept absolviert. Mit über 30 kW stufenlos regelbarer Dampfleistung durch das innovative Heatpipe-Dampferzeuger-Konzept ist ein erster Schritt in Richtung Up-Scale unternommen. Die experimentellen Untersuchungen an der Pilotanlage helfen gemeinsam mit thermodynamischen Simulationen optimale Betriebspunkte für Großanlagen zu charakterisieren und zu erproben.

>> Speicher



### Umsetzung eines Modell-BHKW mit realer Dehydrierung

Im Projektjahr 2021 wurde im Forschungsschwerpunkt effiziente Wasserstoffnutzung (FSP 3) die Dehydrierung und Motorbetrieb zur Stromerzeugung erfolgreich kombiniert. Dazu wurde in den Zylinderkopf des Verbrennungsmotors des BHKW ein Wasserstoffdirekteinblaseventil integriert. Als Dehydriereinheit kommt der im FSP 2 entwickelte Reaktor zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen ein signifikantes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial. Der motorische Wirkungsgrad sowie auch die Gesamtbilanz konnten gezielt optimiert werden.

>> Speicher



### Betrieb und Umrüstung der miniOne-Anlage

Zur Untersuchung des oneReactor-Konzepts wurde die miniOne-Anlage im dafür vorgesehenen Container im Speicherhaus in Betrieb genommen. Es wurden die Dehydrierung und die Hydrierung des LOHC-Systems Dibenzyltoluol/Perhydrodibenzyltoluol untersucht. Für weitere umfassende Charakterisierungen der Anlage soll eine Umstellung auf das LOHC-System Benzyltoluol/Dibenzyltoluol erfolgen. Dabei sind unter anderem Untersuchungen hinsichtlich der Zyklenstabilität des Trägermaterials in den folgenden Jahren 2022/2023 vorgesehen.

[>> Speicher](#)



### Effiziente H<sub>2</sub>-Freisetzung aus LOHC

Die endotherme Freisetzung des in einem flüssigen organischen Wasserstoffträger (LOHC) gebundenen Wasserstoffs benötigt Energie in Form von Wärme. Eine Steigerung der Systemeffizienz und der Dynamik der Wasserstofffreisetzung kann über eine direkte Beheizung der Dehydriereinheit mit einem Brenner erzielt werden. Der methanbetriebene Porenbrenner ermöglicht eine gleichmäßige Wärmeerbringung in das Reaktionsvolumen und eine zuverlässige Temperaturregelung innerhalb des Freisetzers.

[>> Speicher](#)

# EnCN im Überblick

Im Jahr 2017 startete der Energie Campus Nürnberg (EnCN) in die zweite Förderphase. Der Freistaat Bayern förderte die Kooperation im Zeitraum bis 2021 mit insgesamt 25,6 Millionen Euro. Die Fördermittel standen insbesondere für die Fortführung der erfolgreichen Forschungsarbeiten und die weitergehende Vernetzung der Partner, sowie für die Geschäftsstelle und den Betrieb der gemeinsamen Forschungsimmoblie zur Verfügung. Damit konnte die institutionen- und disziplinübergreifende Zusammenarbeit der Wissenschaftler im EnCN weitergeführt und vertieft werden. Die Zusammenarbeit der Partnerorganisationen im EnCN wurde in einem Memorandum of Understanding (MoU) geregelt, das von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (THN), dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie (IISB), dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) sowie dem Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE) gemeinsam ausgearbeitet wurde. Die Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach ist in der zweiten Förderperiode als weiterer Forschungspartner des EnCN mit Projektbeteiligung im Forschungsbereich Effizienz hinzugekommen.



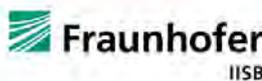
**Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**  
Mit 38.000 Studierenden und 260 Studiengängen eine der größten, forschungsstärksten und innovativsten Universitäten in Deutschland.



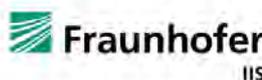
**Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm**  
Eine der größten und forschungsstärksten Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Deutschland, mit rund 13.000 Studierenden.



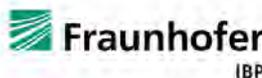
**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.**  
Materialforschung, Komponentenentwicklung und Systemoptimierung in den zentralen Bereichen Energiespeicherung, Energieeffizienz und Erneuerbare Energien.



**Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie IISB**  
Leistungselektronik, Intelligente Energiesysteme, Elektromobilität, Halbleitertechnologie, Materialien für die Elektronik und Energietechnik.



**Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS**  
Angewandte Forschung und Entwicklung für kognitive Sensorik, Datenerfassung, Kommunikationstechnologien, Datenauswertung und Steuerung mit künstlicher Intelligenz.



**Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP**  
Angewandte Forschung und Entwicklung auf den Gebieten Energieeffizienz, Raumklima, Akustik, Hygiene und Sensorik, Baustoffrecycling, Hygrothermik und ganzheitliche Bilanzierung.



**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.

Abbildung 1: Forschungspartner im EnCN

# 1 Organisation

Die Organisation des Energie Campus Nürnberg besteht im Wesentlichen aus zwei Strukturen. Eine übergeordnete Leitungsstruktur, bestehend aus der *Wissenschaftlichen Leitung*, sowie der *Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung* des EnCN und der Geschäftsstelle des EnCN (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 bereichsübergreifenden Drittmittelprojekten zusammen.

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

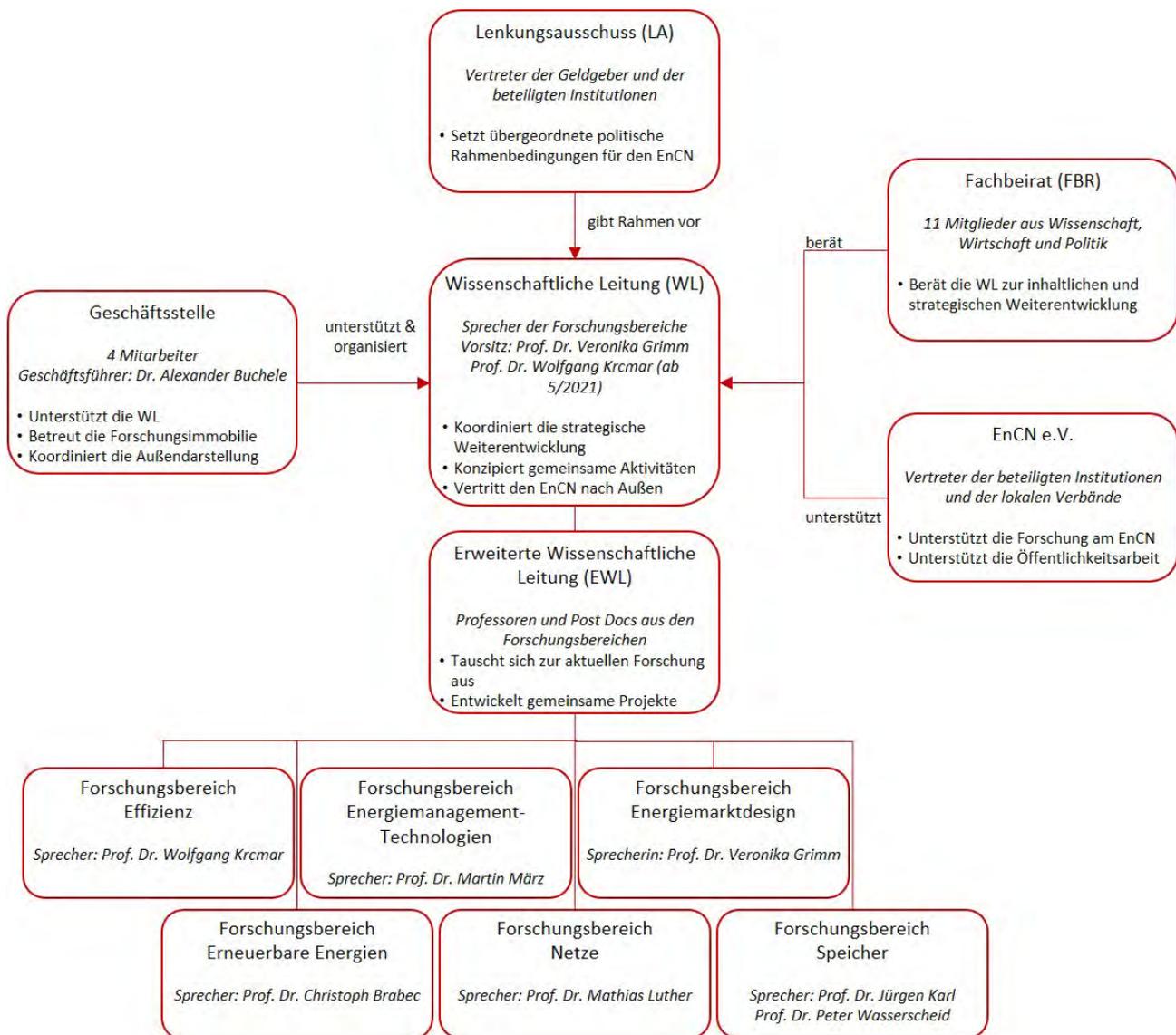


Abbildung 2: Überblick über die Gremienstruktur des EnCN sowie deren Zusammensetzung und zentrale Aufgaben

## Themen- und Projektstruktur

Inhaltlich orientieren sich die sechs Forschungsbereiche des EnCN entlang der Energiekette, von der regenerativen Energieerzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zur effizienten Nutzung von Energie (Abbildung 3). Außerdem bearbeiten die Forschungspartner bereichsübergreifend gemeinsame Verbundprojekte, die auf dem Campus des EnCN zusammengeführt werden.

### Forschungsbereiche des EnCN



Abbildung 3: Überblick über die EnCN - Forschungsbereiche entlang der Energiekette

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 Forschungsschwerpunkte Netze und Energiemanagement-Technologien werden durch die Gründerinstitutionen finanziert. Die Forschungsschwerpunkte beinhalten 18 Teilprojekte mit insgesamt 44 Unterprojektleitern. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend und disziplinübergreifend organisiert. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilaufgaben werden aber auch in den Forschungseinrichtungen durchgeführt, weil in der Infrastrukturausstattung des EnCN nicht alle benötigten Laboreinrichtungen vorhanden sind.

Insgesamt wurde während der ersten beiden Förderperioden von 2011 bis 2021 eine tragfähige Struktur der verschiedenen Disziplinen und Institutionen aufgebaut, die nun eine solide Basis mit zahlreichen Anknüpfungspunkten bildet.

In allen Forschungsbereichen bearbeiten die Wissenschaftler Drittmittelprojekte, die von verschiedensten Fördermittel- bzw. Auftraggebern (Land, Bund, EU, Industrie) finanziert werden. Dabei haben sich für die künftige Stoßrichtung der EnCN-Forschung 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.

Wasserstoff-E-Fuels-Anwendungen	Effiziente Gebäude	Intelligente Energiesysteme
ERNEUERBARE ENERGIEN Stromerzeugung	ERNEUERBARE ENERGIEN Stromerzeugung	ERNEUERBARE ENERGIEN PV Integration
SPEICHER LOHC, Industrieprozesse	NETZE Elektrische Versorgungsnetze	SPEICHER H2 Speicher, Thermische Speicher
EFFIZIENZ Antriebstechnik, Industrieprozesse	EFFIZIENZ Baustoffe, Gebäudetechnik	NETZE Elektrische Versorgungsnetze
ENERGIEMARKTDESIGN Marktdesign, Logistik	ENERGIEMARKTDESIGN Geschäftsmodelle und Nutzerakzeptanz	EFFIZIENZ Steuer- und Regelungstechnik
ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN Leistungselektronik	ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN Simulation und Optimierung	ENERGIEMARKTDESIGN Investitionsanreize, Rechtsrahmen Optimierte Betriebsführung
		ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN Simulation und Optimierung

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. Eine Ausnahme 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 zur Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung.



Abbildung 5: Wissenschaftliche Leitung (1. Reihe v.l.n.r. Prof. Luther, Prof. Grimm, Prof. Wasserscheid, 2. Reihe v.l.n.r. Prof. März, Prof. Brabec, Prof. Krcmar, Prof. Karl)

Mitglieder der Wissenschaftliche Leitung sind:

**Vorsitzende der**

**Wissenschaftlichen Leitung:** Prof. Dr. Veronika Grimm (FAU) - von 5/2017 bis 4/2021  
 Prof. Dr. Wolfgang Krcmar (THN) - von 5/21 bis 4/23

**Sprecher der  
Forschungsbereiche**

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

### Erweiterte Wissenschaftliche Leitung (EWL)

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

Tabelle 1: Mitglieder der Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung im Zeitraum 2017-2021

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 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. Die Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Sie ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bzw. den Sprecher bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Die Geschäftsstelle organisiert auch die Zusammenarbeit mit dem EnCN Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind bis zum 31.12.2021 beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Ab dem 01.01.2022 wird die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg die Trägerschaft der Geschäftsstelle übernehmen. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.



*Abbildung 6: Team der Geschäftsstelle  
(v.l.n.r. Alisa Zellner, Ioanna Dimopoulou, Dr. Alexander Buchele, Kristin Zeug, Wolfgang Schlaffer)*

Die Geschäftsstelle besteht aus:

<b>Geschäftsführer</b>	Dr. Alexander Buchele
<b>Assistenz</b>	Ioanna Dimopoulou
<b>Projektmanagement</b>	Kristin Zeug
<b>Gebäudemanagement</b>	Wolfgang Schlaffer
<b>Design und Fotografie</b>	Alisa Zellner
<b>Unterstützung Administration</b>	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. Der Förderverein lobt jährlich den ENCN Energiepreis und das Reisestipendium aus.

<b>Vorstandsvorsitzender</b>	Christian Zens (Kanzler der FAU)
<b>Stellvertretende Vorsitzende</b>	Prof. Dr. Arno Dentel (THN) Prof. Dr. Albert Heuberger (Leiter des Fraunhofer IIS)
<b>Weitere Vorstandsmitglieder</b>	Prof. Dr. Vladimir Dyakonov (Vorstand des ZAE Bayern) Dr. Michael Fraas (Wirtschaftsreferent der Stadt Nürnberg)
<b>Geschäftsstelle</b>	Peter Haas (Wirtschaftsförderung der Stadt Nürnberg)

## Lenkungsausschuss

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

## Fachbeirat

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



Abbildung 7: Fachbeirat (1. Reihe v.l.n.r. Prof. Luther, Prof. Lorenz, Prof. Weidner, 2. Reihe v.l.n.r. Dr. Hellinger, Dr. Fraas, Prof. Kempfert, Prof. Westermann, Prof. Weber, Dr. Klaus Molitoris)

### Mitglieder des Fachbeirats

Dr. Reinhold Achatz - Aufsichtsrat Unity AG  
 Dr. Michael Fraas - Wirtschaftsreferat der Stadt Nürnberg  
 Josef Hasler - Vorstand N-ERGIE AG  
 Prof. Dr. Rolf Hellinger - Vice President Siemens AG  
 Prof. Dr. Claudia Kemfert - Abteilungsleiterin DIW Berlin  
 Prof. Dr. Leo Lorenz - Präsident European Center for Power Electronics  
 Prof. Dr. Joachim Luther - ehem. Leiter Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
 Markus Löttsch - IHK Nürnberg für Mittelfranken  
 Prof. Dr. Christoph Weber - Universität Duisburg-Essen  
 Prof. Dr. Eckhard Weidner - Leiter Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
 Prof. Dr. Dirk Westermann - Institutsdirektor Technische Universität Ilmenau

### Berichtswesen

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

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

Der Jahresbericht besteht aus den Berichten der einzelnen Forschungsbereiche und Projekte. Er ist ein internes Dokument, um die Fördermittelgeber über den Fortschritt der Arbeiten und die Entwicklung des Energie Campus Nürnberg zu informieren. Der hier vorgelegte interne Abschlussbericht enthält eine Zusammenfassung über den Förderzeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2021.

### Zahlen und Fakten

Die zweite Förderperiode verlief sehr erfolgreich. Insgesamt arbeiteten 155 Forscherinnen und Forscher in den sechs Forschungsbereichen, davon 45 Mitglieder der EWL und 110 Mitarbeiter. Darüber hinaus sind ständig Studierende der drei beteiligten Hochschulen im EnCN aktiv und bearbeiten im Rahmen der laufenden Forschungsprojekte ihre Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen. Die Forschungsarbeiten verteilen sich auf eine Fläche von 5.200 qm mit insgesamt 30 Laboren, Technika und Büroräumen.

Mit einer Grundförderung des StMWK von rund 26 Mio € haben die Akteure im EnCN seit Beginn der zweiten Förderphase zusätzlich Drittmittel von insgesamt rund 42 Mio € eingeworben. Diese Mittel verteilen sich auf über 250 Einzelprojekte mit insgesamt mehr als 310 Partnern aus Industrie und Wissenschaft. In der zweiten Förderphase wurden bislang 25 Patente angemeldet.



Abbildung 8: Das EnCN Hauptgebäude bietet auf einer Fläche von 5000 qm, verteilt auf 5 Stockwerke, Raum für rund 150 Forscher und für Veranstaltungen mit bis zu 170 Besuchern.

## Standort und Netzwerk

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

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

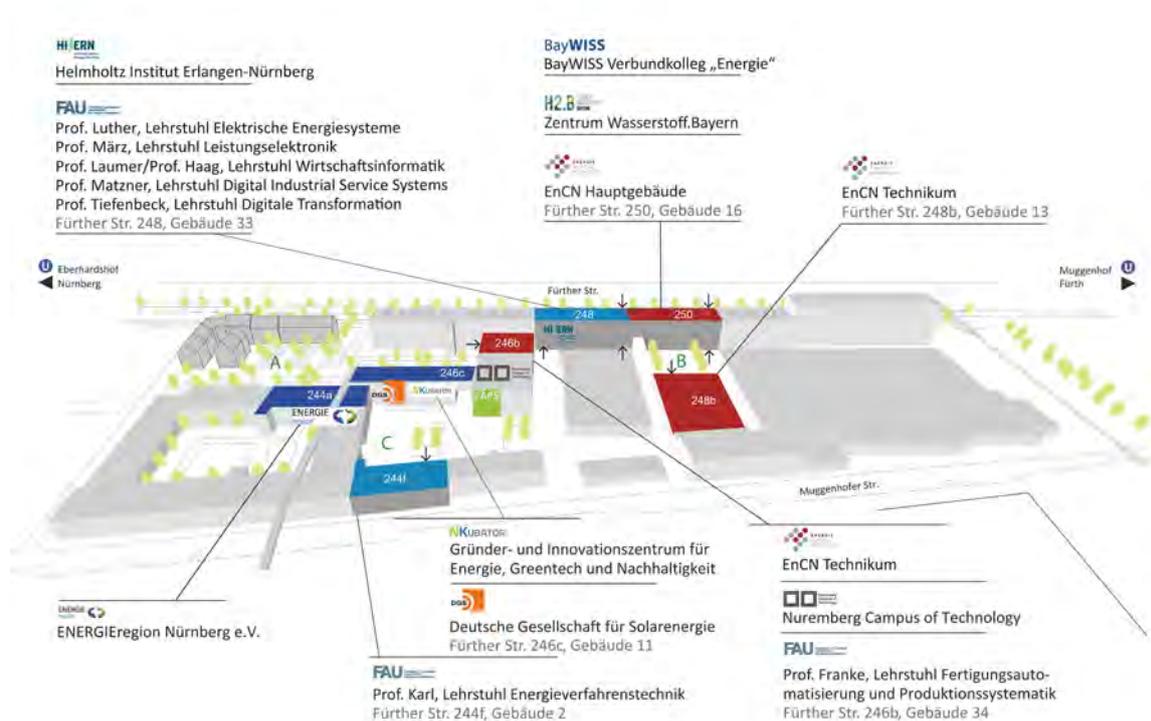


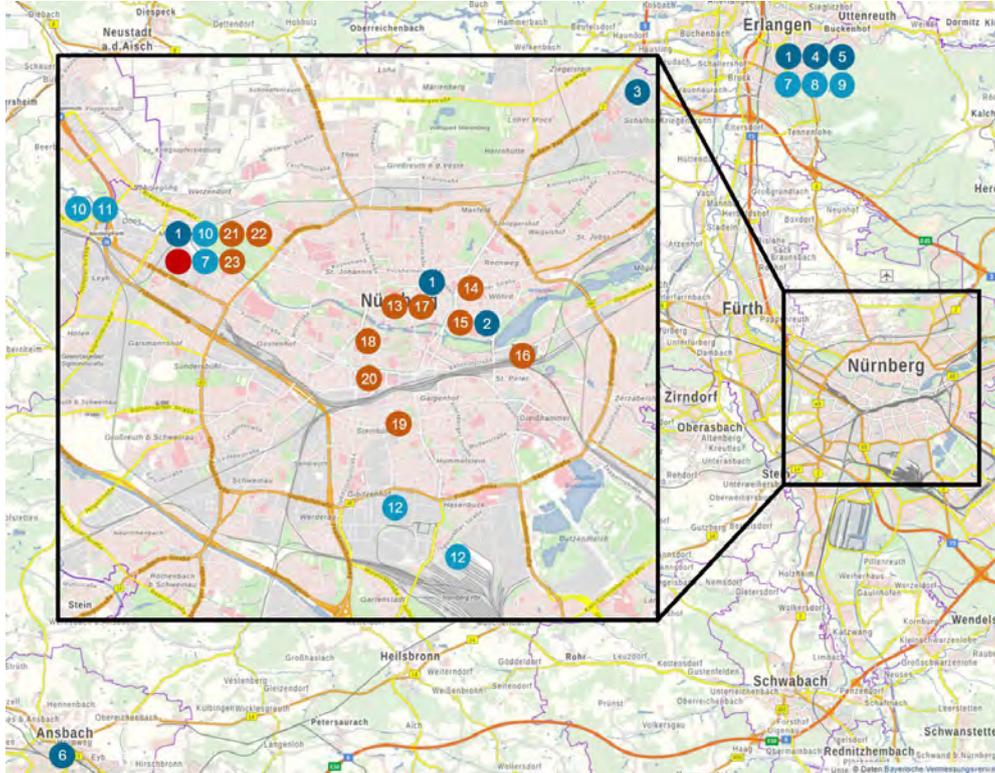
Abbildung 9: Der EnCN befindet sich in der Nürnberger Weststadt, auf dem ehemaligen AEG Gelände, direkt an der Fürther Straße.

In der zweiten Förderphase wurden am EnCN verschiedene Umzüge und Umbaumaßnahmen durchgeführt. So entstand unter anderem ein großes Speichertechnikum („Speicherhaus“), in dem verschiedene Energiespeicher-Technologien im Pilotmaßstab betrieben werden.

## Netzwerk

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

## Rückblick 2017 - 2021

Die Wissenschaftliche Leitung hat seit 2017 sukzessive die Weiterentwicklung des EnCN vorangetrieben. Ziel dabei war, die Vernetzung und Kooperation untereinander zu stärken und auszubauen. Der Forschungsverbund soll sowohl für den Wissenschaftsstandort einen Nutzen generieren als auch für die regionale Wirtschaft. Zentrale Bausteine der Zusammenarbeit am EnCN sind die wissenschaftliche Kooperation, der Technologietransfer, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die Öffentlichkeitsarbeit mit Netzwerkaktivitäten. Diese vier Handlungsfelder stellen den Tätigkeitsrahmen des EnCN dar und bilden die Grundlage für die Schaffung eines Mehrwerts durch gemeinsame Forschung.

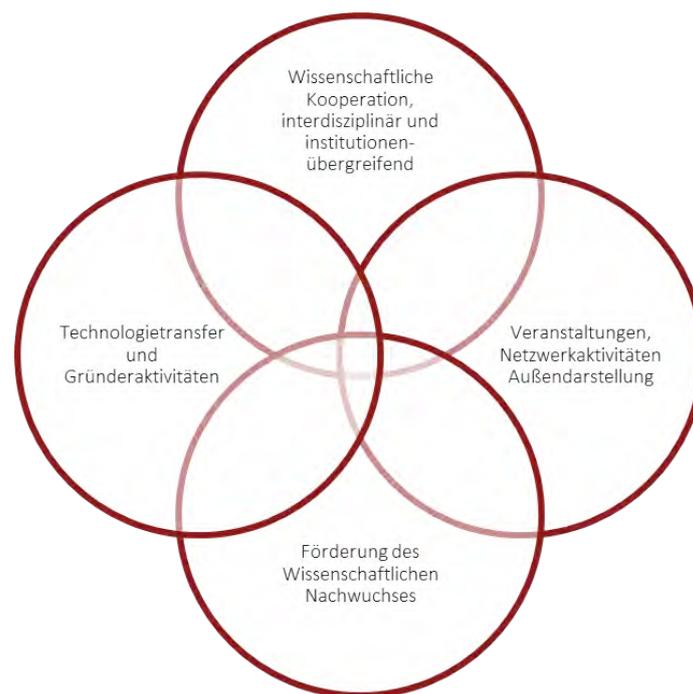


Abbildung 11: Zentrale Handlungsfelder des EnCN

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

### Wissenschaftliche Kooperationen und Aktivitäten

#### *Strukturbildende Verbundprojekte*

Die Forschungsschwerpunkte des EnCN sind auf interdisziplinäre Kooperation ausgerichtet. Um die wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen den Forschenden und beteiligten Institutionen zu stärken und die inhaltliche Weiterentwicklung der Forschungsschwerpunkte am EnCN zu unterstützen, sollen Verbundprojekte ins Leben gerufen werden. Dabei wird insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs ermutigt, Forschungsanträge zu stellen, um ihr Netzwerk im EnCN aus- bzw. aufzubauen. In einem Projekt sind immer mindestens 2 Institutionen vertreten. Im umfangreichen Antrags- und Begutachtungsprozess im Laufe des Jahres 2021 wurden acht Projekte ausgewählt, die ebendiese Voraussetzungen erfüllen und zur weiteren Stärkung der Zusammenarbeit im EnCN beitragen werden. Der Prozess wurde aktiv von der EnCN Geschäftsstelle koordiniert und begleitet. Die Antragssteller rekrutieren sich aus EnCN-Wissenschaftlern der FAU, THN und HS Ansbach, aber auch aus dem NCT. Die Verbundprojekte werden vom StMWK mit einer Anschubfinanzierung gefördert, für die eigentliche Durchführung der Projekte sollen Drittmittel eingeworben werden. Die Umsetzung erfolgt im Jahr 2022.

Tabelle 2: Projektskizzen für Strukturbildende Verbundprojekte

Projekttitlel	Antragssteller	Institutionen
Plattform für eine hybride chemo-enzymatische Elektrosynthese von E-Fuels	- Prof. Katharina Herkendell - Prof. Tanja Franken - Prof. Kathrin Castiglione - Prof. Maik Eichelbaum - Prof. Frank Opferkuch	- FAU/EVT - THN/NCT
LOHC - basierter elektrischer Antriebsstrang für die Binnenschifffahrt	- Prof. Armin Dietz - Florian Bauer	- THN - FAU/LTT
Experimentelle und modellbasierte Entwicklung eines absorptiven Plattenreaktors zur effizienten Synthese des chemischen Energiespeichers Methanol	- Prof. Martin Peter Elsner - Dr. Patrick Schühle	- THN - FAU/CRT
Organische Photovoltaik-Folien mit schaltbarer Transparenz für Fenster und Glasfassaden energieeffizienter Gebäude	- Dr. Andreas Distler - Prof. Wolfgang Heiß - Prof. Arno Dentel - Prof. Roland Krippner	- FAU/IMEET - THN
Quartier Opt - Weiterentwicklung von technisch-ökonomischen Modellen zur Optimierung der technischen Konfiguration und Betriebsführung von Quartieren	- Dr. Jonas Egerer - Prof. Arno Dentel	- FAU/VWL - THN
CO <sub>2</sub> -arme effiziente Gussproduktion unter Einsatz regenerativer Energieträger in volatilen Strommärkten	- Prof. Wolfgang Schlüter - Prof. Sebastian Müller - Fabian Teichmann, M.Sc.	- HSA - FAU/NCT
Modellbasierte Optimierung von Zwangsdurchlaufverdampfern in der Kältetechnik	- Dr. Patric Müller - Prof. Frank Opferkuch	- FAU/MSS - THN/NCT
Herstellung und Charakterisierung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren zur Anwendung in Sorptionsspeichern	- Dr. Marcus Fischer - Prof. Barbara Hintz (Nachfolge Prof. Krcmar)	- FAU/ECRC - THN

### Konferenzen und Seminare

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

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

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
<b>2017</b>		
02.02., EnCN	CMTS-Podiumsdiskussion: Fünf Jahre nach Fukushima – Energiewende Quo Vadis: Dezentrale Antworten für eine globale Herausforderung?	Prof. Veronika Grimm, Prof. Gregor Zöttl, sowie weitere Forscher der FAU
16.-17.02., EnCN	3. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop	Prof. Veronika Grimm, Prof. Gregor Zöttl, sowie weitere Forscher der FAU
09.-10.03., EnCN	Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss des Bundes Deutscher Gießereiunternehmen (BDG)	Prof. Wolfgang Schlüter
04.04., EnCN	Workshop mit der N-ERGIE	Prof. Veronika Grimm

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
27.-28.04., EnCN	Young Energy Economists and Engineers Seminar	Prof. Veronika Grimm, Dr. Jonas Egerer
26.-28.06., EnCN	IEEE Power and Energy Student Summit 2017	Prof. Matthias Luther, Dr. Gert Mehlmann
27.-29.06., Nürnberg	IEEE International Conference on DC Microgrids	Prof. Martin März
17.-18.07., EnCN	Smart City Energy Jam	Dr. Alexander Buchele, sowie die Wirtschaftsförderung der Stadt Nürnberg
15.09., EnCN	Abschlusskolloquium "Wasserstoffversorgung in der Mobilität"	Prof. Wolfgang Arlt, Prof. Dr. Peter Wasserscheid
27.09., EnCN	13. Arbeitssitzung des „Innovationsring Hintermauerziegelindustrie“	Prof. Wolfgang Krcmar
<b>2018</b>		
22./23.02., Berlin	Workshop Energiemarktmodellierung	Prof. Veronika Grimm, Prof. Gregor Zöttl
08.05., EnCN	Workshop Nanophotonics by Nanocrystals, from integration to single photon operation	Prof. Wolfgang Heiß
24.-25.5., EVT	Workshop on Methanation and Second Generation Fuels	Prof. Jürgen Karl
26.06., EnCN	Partner-Workshop Wallonien	Dr. Alexander Buchele
17.-18.07., NürnbergMesse	iSEnEC – Integration of Sustainable Energy Expo & Conference	NürnbergMesse, EnCN, u.a
19.07., EnCN	International Symposium "Organic Photovoltaics - Spectroscopy and Degradation"	Prof. Christoph Brabec
08./09.11., Nbg.	Konferenz "Gender Economics and the Workplace"	Prof. Veronika Grimm
<b>2019</b>		
23.05., Fakultät WiSo	1. Wirtschafts- und Wissenschaftskongress #NEUdialog	Prof. Veronika Grimm
30.09.-01.10., EnCN	Doktoranden-Kolloquium Bioenergie	Prof. Jürgen Karl
09.-10.10., EnCN	Tagung Nichtmetalldruckgusstechnik	Prof. Wolfgang Schlüter
17.10., EnCN	Workshop "The Potential of Hydrogen in Decarbonized Energy Economy"	Prof. Veronika Grimm
25.10., EnCN	Treffen Deutscher Diskreter Optimierer	Prof. Frauke Liers
08.-10.12., EnCN	4 <sup>th</sup> International Conference on Next Generation Solar Energy (NGSE4)	Prof. Christoph Brabec
<b>2020</b>		
14.-15.01., EnCN	Plenarsitzung EU-Projekt "LightCoce"	Prof. Wolfgang Krcmar
18.11., online	NEUdialog 2020 - Zukunft Wasserstoff	Prof. Veronika Grimm
02.12., online	Regenerative Energien und Kältetechnik	Prof. Arno Dentel
07.-09.12., online	next generation solar energy conference	Prof. Christoph Brabec
<b>2021</b>		
27.-28.5., online	Workshop on Methanation and Second Generation Fuels	Prof. Jürgen Karl
18.9., online	Carnot Batterien: Thermische Stromspeicher	Prof. Jürgen Karl



Abbildung 12: Plenarsitzung zum EU-Projekt „LightCoce“ (links) – Workshop Energy Jam (mitte) – Mitschnitt Konferenz NGSE (rechts)

### Studien

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

Tabelle 4: Erstellte Studien

Erscheinungsjahr	Studien	Verfasser
2017	Studie für die Metropolkommission "Regionalkomponenten bei der EE Vergütung"	Prof. Veronika Grimm
2017	Machbarkeitsstudie für BMVI "Wasserstoff im Schwerlastverkehr"	Prof. Wolfgang Arlt/Prof. Peter Wasserscheid et al.
2018	Klimawende - Eine Energiebilanz von morgen	Prof. Jürgen Karl
2019	Deutschland ohne erneuerbare Energien	Prof. Jürgen Karl
2021	Screening Wasserstoff Technik	Prof. Jürgen Karl

### 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 5: Laufende Großprojekte mit Bezug zum EnCN

Projekt	Kurzbeschreibung	Koordinator
SFB/Transregio 154 Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken	2018 wurde der seit 2014 laufende TRR 154 verlängert. Verschiedene Wissenschaftler aus dem EnCN kooperieren in diesem Verbundprojekt mit Forschern der TU Berlin, der HU Berlin und der TU Darmstadt. In diesem Projekt werden unter anderem auch Erkenntnisse aus den Arbeiten des Bereichs Energiemarktdesign am EnCN genutzt.	Prof. Alexander Martin
LOHC-Zugprojekt am HI ERN	HI ERN erhält den Förderbescheid vom StMWi für 5 Jahre, um in einem Demonstrationsprojekt einen LOHC-betriebenen Zug zu entwickeln. Hierfür greift das HI ERN auch auf Vorarbeiten aus dem EnCN zurück.	Prof. Peter Wasserscheid
Kopernikus Ensure		Prof. Matthias Luther
Kopernikus P2X		Prof. Peter Wasserscheid

### Berufungen und persönliche Auszeichnung

Verschiedene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem EnCN erhielten in den vergangenen Jahren Rufe und persönliche Auszeichnungen oder wurden in Expertengremien berufen. Die Wichtigsten sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 6: Rufe und persönliche Auszeichnungen am EnCN

Name	Beschreibung
<b>2018</b>	
Prof. Wolfgang Arlt Prof. Peter Wasserscheid	Wolfgang Arlt und Peter Wasserscheid wurden gemeinsam mit Daniel Teichmann (Hydrogenious) für den deutschen Zukunftspreis 2018 nominiert. Auch wenn der Preis letztlich an die AiCuris Anti-infective Cures GmbH vergeben wurde, so ist bereits die Nominierung eine große Ehre und Ansporn, die Forschungsaktivitäten im Bereich LOHC intensiv weiter zu treiben.
Prof. Veronika Grimm	Veronika Grimm wurde 2018 in folgende Gremien berufen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitglied des Energy Steering Panel of EASAC (European Academies' Science Advisory Council) auf Vorschlag der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina</li> <li>• Mitglied des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen am Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz</li> <li>• Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie</li> </ul>
Prof. Martin Schmidt	Martin Schmidt, Inhaber der Professur für Optimierung von Energiesystemen an der FAU nahm einen Ruf auf eine W3-Professur an die Universität Trier an. Er bleibt dem EnCN jedoch als Research Fellow erhalten.
<b>2019</b>	
Prof. Reinhard German	Reinhard German hat 2019 einen Ruf als Full Professor „IT for Energy“ an die Monash University in Melbourne erhalten und abgelehnt
Prof. Veronika Grimm	Veronika Grimm wurde 2019 in folgende Gremien berufen Berufung in den Zukunftskreis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung Berufung in die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Gunnar Grün	Ruf als Professor für Bauphysik an das Institut für Akustik und Bauphysik der Universität Stuttgart
Prof. Alexander Martin	Berufung als Institutsleiter an das Fraunhofer IIS
Prof. Lars Schewe	Ruf an die Universität Edinburgh
Prof. Peter Wasserscheid	Berufung als Ordentliches Mitglied in die Bayerische Akademie der Wissenschaften Siemens „Inventor of the Year“ in der Kategorie „Herausragende Erfindung“ für Entwicklung einer effizienten Methanolsynthese aus CO <sub>2</sub>
<b>2020</b>	
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
<b>2021</b>	
Prof. Alexander Buchele	Ruf an die Hochschule Ansbach auf die Professur für Simulation für Energieeffizienz und nachhaltige Produktionsprozesse
Prof. Marco Pruckner	Ruf als Professor für Computer Science (Modeling and Simulation) an die Universität Würzburg

## Technologietransfer

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

Demonstration von Technologien im industriellen Maßstab liegt. Exemplarisch werden einige relevante Technologietransfer-Projekte aufgeführt:

Tabelle 7: Ausgewählte Projekte mit Technologietransfer

Projektname	Forschungsbereich
AiF-Projekt OLE3D: Entwicklung eines Systems zur Funktionalisierung 3-dimensionaler Flächen mit optoelektronischen Bauelementen (gemeinsam mit Neotech GmbH/Nürnberg, Seho Systems GmbH/Kreuzwertheim, KH Foliotec GmbH/Sparneck, Inotech GmbH/Nabburg)	Erneuerbare Energien
BFS-Projekt Organolas: Entwicklung eines Lasersystems zur Strukturierung organischer Solarmodule mit Nanosekunden-Pulsen (gemeinsam mit Innolas GmbH/Krailling und LS Lasersystems GmbH/München)	Erneuerbare Energien
BMBF-Projekt POPUP: Entwicklung von hocheffizienten, langlebigen und ästhetisch anspruchsvollen gedruckten Solarmodulen (Leonhard Kurz/Fürth, PolyIC/Fürth, Belectric/Nürnberg und Kitzingen, Webasto/Stockdorf, Siemens/München)	Erneuerbare Energien
BMW i InnoSys 2030: Deutschlandweites Verbundprojekt mit Fokus auf eine höhere Netzauslastung durch eine innovative Systemführung	Netze
BMW i Projekt Power-to-Biogas - Integration von Power-to-Gas an eine Biomethananlage zur Direktmethanisierung von Biogas	Speicher
BMW i-Projekt Fassade <sup>3</sup> : Entwicklung eines modularen und multifunktionalen Fassadenelements mit integrierter Photovoltaik“ (OPVIUS GmbH/Nürnberg & Kitzingen, Innopark/Kitzingen)	Effizienz
BMW i-Projekt KOSINEK: Simulation von grundlastfähigen Speichern im deutschen Stromnetz	Energiemanagement-Technologien
EOM+: Auswirkungen von regionalen Smart Markets auf das deutsche Energiemarktdesign	Energiemarktdesign
EU-Projekte „LightCoce“ und „Hypobrick“: Fokus auf Baustoffoptimierung und Reststoffverwertung	Effizienz
FlexBiomethane - Direktmethanisierung von Biogas zur lokalen Stromspeicherung an kleinen Biogasanlagen über nachgerüstete Power-to-Gas Einheiten (gefördert durch BMEL)	Speicher
Horizon2020-Projekt SolBio-Rev: Solar- und biomasseunterstütztes Energiesystem für Gebäude unter Nutzung von reversiblen ORC-Prozessen	Speicher
HerzoBase-Energiespeicherhäuser/Herzo Opt: Aufbau und Langzeitmonitoring von 8 hochgedämmten Reihenhäusern nach dem KfW Standard 40 Plus	Effizienz
HySTOCK: Demonstration einer Wasserstofflogistik auf LOHC-Basis bis hin zur Nutzung an der Tankstelle	Speicher
i <sup>3</sup> Upgrade: Umwandlung von kohlenstoffhaltigen Abgasen aus der Stahlindustrie zu Methan und anderen wertschöpfenden Koppelgasen	Speicher
BMBF-Projekt „Einfluss der Fertigung auf das technische Betriebsverhalten wechselstromgespeister Elektromotoren“ (ImpACTB)	Effizienz
BMW i-Projekt COSIMA „Ertragskontrolle und –vorhersage von Solarparks durch intelligentes Qualitätsmanagement“: Erhöhung der Ausfallsicherheit von Solarparks	Effizienz

Projektname	Forschungsbereich
Industrieprojekt „Multi-Battery Systems“ im Rahmen des Siemens Campus Future Energy Systems	
Industrieprojekt MIKA: Modellbasierte intelligente Kleinantriebstechnik zur Effizienzsteigerung in elektrischen Antriebssystemen	Effizienz
Industrieprojekt UWR-PSU: Energieeffiziente ultraweitbereichs DC-DC Wandler für den Schienenverkehr	Effizienz
Industrieprojekte mit Armor SAS/OPVIUS GmbH (Nantes, Nürnberg, Kitzingen) - Aufskalierung der Organischen und der Perowskit PV-Technologie, einschließlich der Entwicklung einer Rolle-zu-Rolle-Maschine für die Herstellung von Perowskit-Solarmodulen	Erneuerbare Energien
InnoProSys: Technologietransfer durch ausgewählte Pilotprojekte in den Bereichen Speicher, Last- und Energiemanagement und Stromerzeugung aus Abwärme mit insgesamt 25 Industriepartnern	Netze
Kuba Projekt: Kooperation mit der Universität Sancti Spiritus Kuba, kubanischen Ministerien und deutschen Anlagebauern zum Aufbau eines Niedrigenergie-Hauses sowie einer Energieeffizienzsanierung	Effizienz
NENUFAR: Entwicklung einer innovativen Energiespeicherlösung für LVDC- und HVDC-Stromnetze in Flugzeugen	Energiemanagement-Technologien
Netz:Kraft (2015-2018): Verbundprojekt zur Erforschung neuer Konzepte für den Netzwiederaufbau bei zukünftigen Kraftwerksstrukturen	Netze
Verbundprojekt DNAguss (BMW) Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, mit dem Fraunhofer-Institut für Keramik und Systeme IKTS und verschiedenen führenden Softwareanbietern wird im Bereich Gießprozess- und FEM-Simulation zusammengearbeitet	Effizienz
ZIM-Projekt „PIASOL“ gemeinsam mit der Fa. Automatic Research Entwicklung eines laserbasierten Systems zur In line-Qualitätskontrolle gedruckter optoelektronischer Bauteile	Erneuerbare Energien
ZIM-Projekt „PV-IL“ gemeinsam mit der Fa. Sciprios Entwicklung einer Rolle-zu-Rolle-Anlage für die Laserstrukturierung gedruckter Solarmodule	Erneuerbare Energien
ZIM-Projekt Hidronik: Entwicklung von organischer Photovoltaik für IoT-Geräte und Integration von Organischer Photovoltaik in Fassadenelemente	Effizienz
ZIM-Projekt Low Haze: Aufbringung einer transparenten Elektrode aus Silbernanodrähten auf flexible Substrate mittels Flexodruck entwickelt (gemeinsam mit RAS GmbH/Regensburg)	Erneuerbare Energien
ZIM-Projekt mobi Inspec: Entwicklung maßgeschneiderte mobile roboter- oder drohnengestützte Verfahren für die Prüfung von Energieversorgungs- und Verteilungsanlagen	Effizienz

### NKubator

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

## Nachwuchsförderung

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

Über Fellowships und ein Alumniprogramm wird der Kontakt zu Absolventen weiter intensiviert und der Netzwerkaufbau gestärkt.

### Nachwuchsprofessoren

Um auch im postgraduierten Bereich den wissenschaftlichen Nachwuchs zu stärken, wurden im direkten Umfeld des EnCN vier W1-Professuren aus dem vom BMBF geförderten Tenure-Track-Programm (1000-Professoren-Programm) ausgeschrieben. Davon sind zwei im Bereich der Verfahrenstechnik (Forschungsbereich Speicher) und zwei in den Wirtschaftswissenschaften (Forschungsbereich Energiemarktdesign) angesiedelt. Der Forschungsbereich Energiemarktdesign wurde im Jahr 2019 durch eine Nachwuchsforschergruppe des Zentrum Digitalisierung Bayern verstärkt. Dr. Verena Tiefenbeck konnte für diese Position gewonnen werden und ist im Frühjahr 2019 von der ETH Zürich an die FAU gewechselt. Dr. Mario Liebensteiner von der WU Wien wurde auf die W1 Professur für Energiemärkte und Energiesystemanalyse berufen. Im Forschungsbereich Speicher wurden Dr. Katharina Herkendell, ebenfalls von der ETH Zürich kommend, auf die W1 Professur für Dezentrale Energieverfahrenstechnik sowie Dr. Tanja Franken vom Paul Scherrer Institut auf die W1 Professur für Katalytische und Elektrokatalytische Systeme und Verfahren berufen.

### EnCN-Energiepreis und EnCN-Reisestipendium

Seit 2017 werden herausragende Abschlussarbeiten (Bachelor und Master), die im Umfeld des EnCN angefertigt wurden mit einem Energiepreis geehrt. Viele der ausgezeichneten Studenten haben nach ihrem Studium einen wissenschaftlichen Weg eingeschlagen und am EnCN weitergearbeitet bzw. promoviert. Informationen zu den Preisträgern sind im Projektbericht der Geschäftsstelle dargestellt. Des Weiteren wurde ein Reisestipendium ausgelobt, das die Wissenschaftler bei der Teilnahme an internationalen Konferenzen finanziell unterstützt. Aufgrund der Corona-Pandemie wurde das Stipendium bisher nur im Jahr 2019 vergeben.

### Bayerisches Wissenschaftsforum (BayWISS)

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

### 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“ in das Fellowship Programm des EnCN 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 8: EnCN Rising Stars und Fellows

	Name	Position/Forschungsinstitut
Rising Stars	Prof. Jakob Albert	Professor für Technische Chemie insbesondere 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

	Name	Position/Forschungsinstitut
	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
	Prof. Alexander Buchele	Professur für Simulation für Energieeffizienz und nachhaltige Produktionsprozesse an die Hochschule Ansbach
	Prof. Marco Pruckner	Professor für Computer Science (Modeling and Simulation) an die Universität Würzburg
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

### *Kooperation mit dem Schülerforschungszentrum*

Aktiviert durch die breite Klimaschutz-Bewegung interessieren sich zunehmend Schülerinnen und Schüler für energiewissenschaftliche Themen. Nürnberger Schulen sind daher wiederholt an den EnCN herangetreten, woraus sich verschiedene Kooperationen entwickelt haben, die Schülerinnen und Schüler schon früh an die Energieforschung heranzuführen. Ausgewählte Schüler aus dem Hochbegabten Modell Mittelfranken haben regelmäßig die Möglichkeit, die EnCN-Jahreskonferenz zu besuchen. Der EnCN unterstützt das Nürnberger Schülerforschungszentrum am Willstätter Gymnasium mit einer studentischen Hilfskraft zur Betreuung der Schülerforschung. Es werden auch gezielte Forschungspraktika, z.B. im Rahmen von P-Seminaren angeboten.



*Abbildung 13: Schüler als Teilnehmer an der Jahreskonferenz des EnCN*

### *Nürnberger Kinderuni am EnCN*

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



Abbildung 14: Kinderuni im EnCN

## Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit

### Jahreskonferenz

Der EnCN veranstaltet jedes Jahr eine Jahreskonferenz, die coronabedingt in den letzten Jahren im hybriden-Format stattfand. Im ersten, internen Teil der Veranstaltung hat insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs Gelegenheit, in parallel durchgeführten Vortragsessions, aktuelle Forschungsergebnisse vorzustellen. Im öffentlichen Teil der Konferenz referiert stets ein Gastredner zu aktuellen Themen. Außerdem geben EnCN Wissenschaftler einen Überblick über aktuelle Forschungsthemen.

Tabelle 9: Gastredner der EnCN Jahreskonferenzen

Name	Vortragsthema
<b>2017</b>	
Prof. Achim Wambach, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung	Energie 2017: Gezielt vorgehen, Stückwerk vermeiden, Auszug aus dem Gutachten der Metropolkommission
<b>2018</b>	
Prof. Joachim Luther, Fraunhofer ISE	Ein integriertes Energiesystem für Deutschland
<b>2019</b>	
Prof. Rüdiger Eichel, Direktor am Forschungsinstitut Jülich	Power-to-X Technologien im zukünftigen Energiesystem
<b>2020</b>	
Dr. Reinhold Achatz, Geschäftsführer der thyssenkrupp Transrapid GmbH	Energiesystem der Zukunft – Einbindung der Stahlindustrie
<b>2021</b>	
Wolfgang Raab, Geschäftsführer der Baugesellschaft Raab mbH & Co KG	Ressourcenschonender Wohnungsbau der Zukunft zwischen Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit



Abbildung 15: Vortrag von Prof. Dr. Achim Wambach (links) und Prof. Joachim Luther (rechts)



Abbildung 16: Vortrag von Prof. Dr. Rüdiger Eichel (links) und Prof. Dr. Armin Dentel und Prof. Dr. Günter Kießling (rechts)



Abbildung 17: Online Vortrag von Dr. Reinhold Achatz

**Weitere Veranstaltungen**

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

Tabelle 10: Termine aus der Veranstaltungsreihe „Faszination Energie“

Veranstaltung	2018	2019	2020	2021
Energie und Solar	X			
Energie und Zukunft	X			
Energie und Steuern	X			
Lesung Prof. Dr. Kemfert		X		
Energie und Architektur		X		
Ask me anything – Energie und Solar			X	
Ask me anything – Energie und Wasserstoff			X	
Ask me anything – Energie und Gebäude				X
Ask me anything – Energie und Elektromobilität				X



Abbildung 18: Energie und Zukunft (links), Lesung Prof. Kemfert (rechts)



Abbildung 19: Ask Me Anything - Online Veranstaltung

### Jubiläumsveranstaltung

Der EnCN feierte 2021 zusammen mit der ENERGIEregion und dem Nkubator den ersten Teil seines 10-jährigen Jubiläums. Unter dem Jubiläums-Motto „Kompetenzen aus der Region für eine nachhaltige (Energie)Zukunft“ soll über ein Jahr verteilt, die Vielfalt der Akteure in der Region vorgestellt werden. Von Juni 2021 bis Juni 2022 finden dazu eine Auftaktveranstaltung, drei Fachveranstaltungen und eine Abschlussveranstaltung statt. Die Auftaktveranstaltung eröffnete am 16. Juni 2021 im hybriden Format das Jubiläum. Neben Dr. Markus Söder sprachen Dr. Michael Fraas (Stadt Nürnberg), Prof. Dr. Hornegger (FAU) und Prof. Dr. Oberbeck (THN) Grußworte. Der Festvortrag mit dem Thema „Bausteine für ein nachhaltiges Energiesystem“ wurde von Prof. Dr. Veronika Grimm gehalten.



Abbildung 20: Impressionen der Auftaktveranstaltung

Zur Einführung und als kleiner Vorgeschmack für die Fachveranstaltungen, wurden Laborgespräche im Video-Format, passend zu den Veranstaltungsthemen, zwischen EnCN Wissenschaftlern und Vertretern der ENERGIEregion aufgenommen. Die Videos sind auf der eigenen Jubiläumswebseite ([www.energiejahr.de](http://www.energiejahr.de)) veröffentlicht.



Abbildung 21: Bilder zu den Laborgesprächen (Prof. Wasserscheid, Prof. März, Prof. Krcmar v.l.n.r)

Die Fachveranstaltung Wasserstoff und Anwendungen fand am 27.10.2021 statt. Der Hauptvortrag wurde von Prof. Wasserscheid gehalten. Weiterhin war die N-ERGIE als Diskutant vertreten. Regionale Kompetenzen stellten Vertreter von MAN SE, HI ERN, PS-HyTech und HySON vor.

Am 10.03.2022 findet die Fachveranstaltung Energiesysteme und Nachhaltigkeit statt. Prof. März ist der fachliche Impulsgeber und diskutiert mit infra fürth aktuelle Themen. Des Weiteren sind Beiträge von Siemens Energy, Cenero, Südwerk, der FAU und dem Bayerischen Zentrum für Batterietechnik geplant.

Die dritte Fachveranstaltung Wärmewende und energieeffiziente Gebäude ist für Mai 2022 geplant. Der fachliche Impulsgeber wird Prof. Krcmar sein.

Als Höhepunkt des Jubiläumsjahrs findet im Juni 2022 die Abschlussveranstaltung in Präsenz statt. Nach langer Coronapause möchten wir den regionalen Akteuren die Möglichkeit für einen aktiven Austausch und Networking ermöglichen.

Neben den Veranstaltungen wird das Jubiläum von der Aktion Gesichter der Energiewende begleitet. Daran können Partner aus der Region teilnehmen und ihren persönlichen Einsatz und Meinung bei der Umsetzung der Energiewende mit Bild und Zitat veröffentlichen. Die Bilder sind auf der Internetseite veröffentlicht. ([www.energiejahr.de/gesichter-der-energiewende](http://www.energiejahr.de/gesichter-der-energiewende))



Abbildung 22: Beispiele für die Aktion „Gesichter der Energiewende“ (Josef Hasler, N-ERGIE, Macus König, Stadt Nürnberg, Prof. Christoph Brabec v.l.n.r.)

### Besuche am EnCN

Regelmäßig besuchen wirtschafts-, wissenschafts- oder politische Vertreter aus verschiedenen Ländern den EnCN. Der Informations- und Wissensaustausch bringt sowohl den Delegierten einen Mehrwert als auch den Vertretern des EnCN, in dem sie Anforderungen und Herausforderungen im Energiebereich aus verschiedenen Ländern erfahren. Bedingt durch die Corona Pandemie hatten wir 2020 und 2021 weniger Besucher.

Tabelle 11: Delegationsbesuche im EnCN

Delegationen	2017	2018	2019	2020	2021
China	3	5	5	1	
Niederlande	1				
Lateinamerika	2	2	2		1
Korea	1	2	3	2	
Schottland					
Südafrika	1	1			
Kanada	2				
Mittelamerika		3	1		
Ukraine		1	1		
Ostafrika		1			
USA			1		
Sri Lanka			1		
Dänemark					1
	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>2</b>



Abbildung 23: Delegation Südafrika (links) und Korea (rechts)



Abbildung 24: Delegationen aus Sri Lanka (links) und aus der Ukraine (rechts)

Gern wird der EnCN von politischen Delegationen und Mitgliedern des Landtags bzw. Bundestags besucht, um sich über den aktuellen Stand der Energieforschung zu informieren oder um sich fachlich auszutauschen. Der EnCN genießt durch seine Neutralität und Fachexpertise hohes Ansehen. Auch hier hatten wir coronabedingt weniger Besucher.

Tabelle 12: Besuche politischer Vertreter

Politik	2017	2018	2019	2020	2021
Deutscher Städtetag	x				
Karsten Klein MdB		x			
Katja Hessel MdB		x			
Britta Dassler MdB			x		
Bayerischer Landtag			x		
Regierungspräsident Mittelfranken			x		
Deutscher Gewerkschaftsbund			x		
Dr. Stefan Kaufmann MdB				x	
Matthias Fischbach MdL					x
CDU NRW Wilnsdorf					x



Abbildung 25: Besuch des Deutschen Städtetags (links) und Besuch von MdB Katja Hessel (rechts)



Abbildung 26: Besuch MdB Dr. Stefan Kaufmann (links) und Besuch der CDU NRW (rechts)

### Materialien für die Öffentlichkeitsarbeit

#### Bilderserie

Nach dem Motto „Bilder sagen mehr als 1000 Worte“ werden regelmäßig Bilder zum Thema „Ich bei der Arbeit“ erstellt. Verwendung finden Sie auf der Homepage, auf Postern, in Präsentationen oder Forschungsberichten.



Abbildung 27: Bilder aus den Forschungsprojekten des EnCN

### Projektbeschreibungen für die EnCN-Website

Die im EnCN durchgeführten Kooperationsprojekte sind beste Beispiele für eine praxisorientierte Forschung. Sie zeigen, wie erfolgreich die 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.



Abbildung 28: Beispiel einer Projektbeschreibung

### Forschungsflyer

In den verschiedenen Forschungsbereichen wurden einseitige Flyer erstellt, die in anschaulicher Weise einzelne Arbeitsschritte in den Forschungsprojekten verdeutlichen. Das Ziel besteht darin, die meist komplizierten Prozesse so darzustellen, dass diese für Laien und Außenstehende verständlich werden.



Abbildung 29: Beispiele der Projektflyer

### Videos

Der EnCN erstellt für ausgewählte Forschungsbereiche und Projekte, wie z.B. für die Herzbase Energiespeicherhäuser, Kurzvideos, die einen Einblick in den Forschungsalltag geben. Im Video „Mein Tag am EnCN“ werden auf attraktive Weise wichtige Forschungsthemen durch Laborführungen vorgestellt. Der Betrachter bekommt das Gefühl, dass er selbst an der Führung teilnimmt. Darüber hinaus wurden in den Jahren 2020 und 2021 zahlreiche EnCN Online-Veranstaltungen

aufgezeichnet. Im Rahmen der Veranstaltungsserien zum 10-jährigen Jubiläum des EnCN entstanden drei Laborgespräche zu den Themen Energiesysteme, Wasserstoff und Effiziente Gebäude mit den Professoren März, Wasserscheid und Krcmar. Alle Videos sind auf dem EnCN YouTube Kanal abrufbar.

Tabelle 13: EnCN Videos

Name des Videos	2018	2019	2020	2021
Energiemarktdesign	x			
Netze	x			
Digitalisierung	x			
Wasserstoff	x			
Gebäude	x			
Antriebe	x			
Energiemanagement-Technologien	x			
EnCN Corporate Forschungsvideo		x		
Projekt Herzobase		x		
Projekt Hypobrick			x	
Projekt Zeppelin			x	
Laborgespräch Wasserstoff und Anwendungen				x
Laborgespräch Energiesysteme				x
Laborgespräch Energieeffiziente Gebäude				x
EnCN Jahreskonferenz			x	x
EnCN Energiepreis			x	x
Vortragsreihe Ask me anything			x	x



Abbildung 30: Ausschnitt EnCN Youtube Kanal

### EnCN Broschüre

Die 2018 neu aufgelegte EnCN Broschüre stellt die Forschungskompetenzen, Möglichkeiten für Kooperationen und die Nachwuchsförderung am EnCN übersichtlich und komprimiert dar. Die drei Forschungsschwerpunkte, Wasserstoff und Anwendungen, Effiziente Gebäude und Intelligente Energiesysteme, werden näher vorgestellt und mit Beispielen besonders wichtiger und wegweisender Projekte hinterlegt.



Abbildung 31: Ausschnitt EnCN Broschüre

**EnCN-Jahreskalender**

Seit 2019 stellt der EnCN seine Forschung in das rechte Licht. Das erste Fotoprojekt entstand mit Bildern der Studierenden der Fakultät Design der THN, zum Thema Energiewende und Sektorenkopplung. Die Arbeiten wurden mit CGI (Computer animierte Grafiken) erstellt. Alle weiteren Fotoprojekte entstanden mit Forschungsobjekten und Wissenschaftlern des EnCN. Die Bilder stellen die technische Infrastruktur oder Projekte des EnCN auf attraktive Weise dar und sollen so den Betrachter neugierig machen, mehr anzuschauen und mit dem EnCN in Kontakt zu treten.

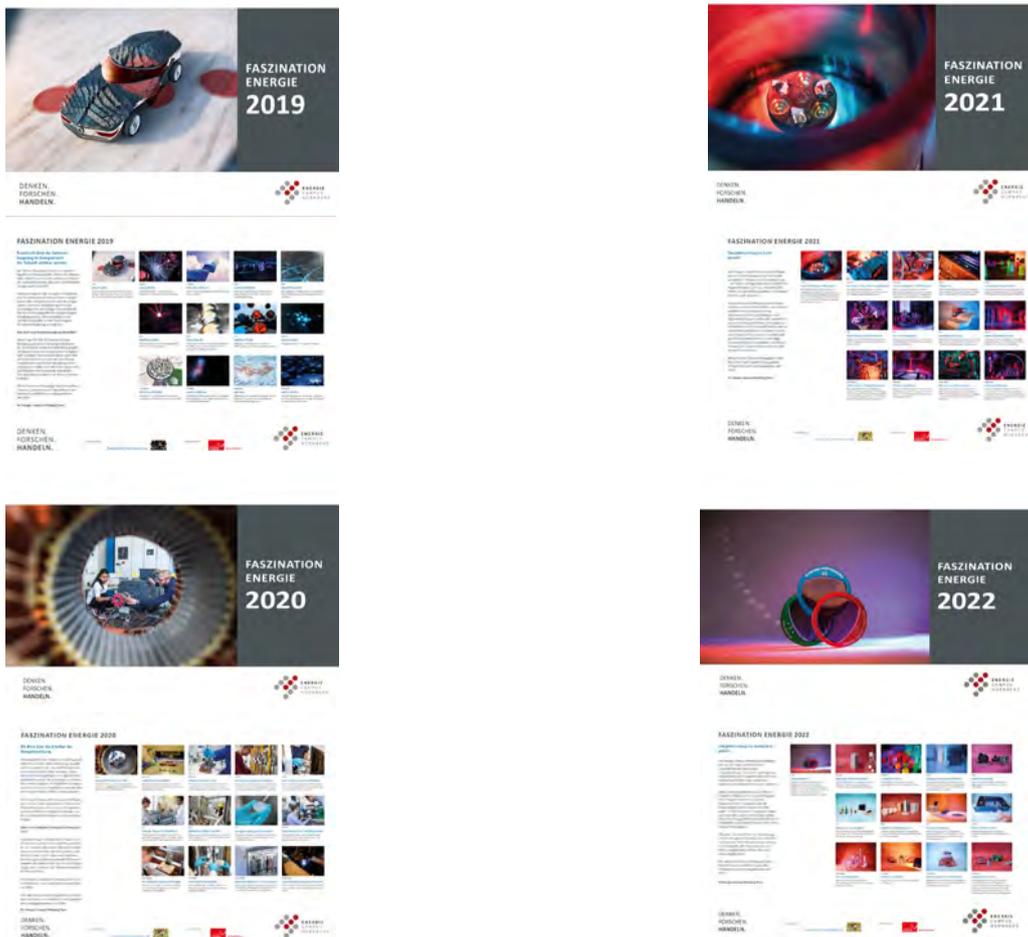


Abbildung 32: Bilder des EnCN Jahreskalenders

## Ausblick 2022

---

### 10-jähriges Jubiläum

Im Jahr 2022 werden zwei weitere Fachveranstaltungen zu den Themen Energiesysteme und Nachhaltigkeit sowie Wärmewende und energieeffiziente Gebäude organisiert. Den Höhepunkt der Feierlichkeiten bildet die Abschlussveranstaltung im Juni 2022. Neben einem geplanten Zukunftstalk „Wie sieht eine nachhaltige Energiezukunft aus?“ steht die Vernetzung und der Austausch der Akteure im Vordergrund.

### Vorbereitungen für 2022+

Die zweite Förderphase endet planmäßig zum Jahresende 2021. Eine der Hauptaufgaben wird zukünftig darin bestehen, ein Nachhaltigkeitskonzept für den EnCN zu erstellen, damit er auch nach 2024 weitergeführt werden kann. Ein Strategieworkshop ist für Februar 2022 geplant. Außerdem werden die Strukturbildenden Verbundprojekte vorangetrieben und zusammen mit den Wissenschaftlern neue Drittmittelprojekte konzipiert und akquiriert.

# GESCHÄFTSSTELLE

## Projektbericht 2017 - 2021

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



Abbildung 1: Aus dem Alltag der Geschäftsstelle

### KONTAKT

**Dr. Alexander Buchele**  
Geschäftsführer



**Telefon**  
+49 911 / 56854 99120

**Web**  
[www.encn.de](http://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 darin, die Wissenschaftliche Leitung (WL) bei der Weiterentwicklung des EnCN über die zweite Förderphase hinaus zu unterstützen. Die Geschäftsstelle koordiniert und organisiert darüber hinaus die Aktivitäten in den einzelnen Forschungsbereichen, insbesondere bei organisatorischen Aufgaben und durch Förderung der Vernetzung, Kontaktvermittlung zu externen Projektpartnern und beim Betrieb der Infrastruktur.

### Koordination Evaluationsbericht

Die Erstellung des am 01.10.2020 vorgelegten Evaluationsbericht wurde von der Geschäftsstelle federführend koordiniert und erstellt. Der Bericht beinhaltet sowohl einen Ergebnisteil als auch ein Strategiekonzept für die Fortführung des EnCN ab dem Jahr 2022.



Abbildung 2: Evaluierungsbericht

### Koordination Task Force „Energie im ländlichen Raum“

In der Lenkungsausschuss-Sitzung im November 2018 gaben die Vertreter von FAU und THN ein Commitment für den Forschungsstandort „Auf AEG“ bis 2030 und setzten zur weiteren Entwicklung der EnCN-Forschung eine Task Force mit Vertretern aus der WL sowie aus den beteiligten Institutionen ein. Die Task Force entwickelte eine disziplin- und institutionsübergreifende Forschungsagenda „Energie im ländlichen Raum“ mit den Teilprojekten „Dezentrale Wärmewende“ und „Dezentrale Mobilitätswende“. Grundidee hierbei war die integrierte Betrachtung neuer Technologien auf Energieflussebene, Daten- und Kommunikationsebene sowie der zugehörigen Marktmodelle. Die Geschäftsstelle koordinierte die Aktivitäten, entwickelte eine Grafik und erstellte eine Broschüre, siehe Abbildung 3 + 4.

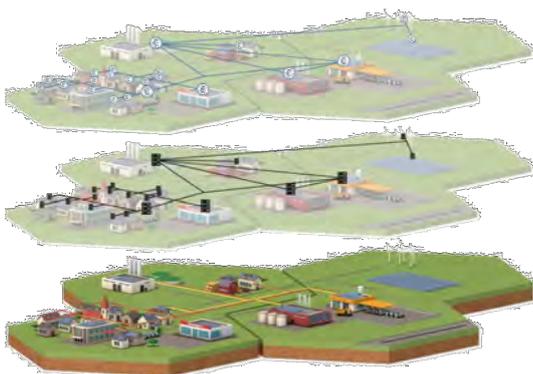


Abbildung 3: Darstellung der Energieströme, Datenströme und Kommunikationspfade und Geldflüsse in einem dezentralen Energiesystem mit Sektorenkopplung



Abbildung 4: Broschüre „Energie im ländlichen Raum“

Die Überlegungen zur Sektorenkopplung wurden später vom Zentrum Wasserstoff.Bayern übernommen und werden jetzt dort bearbeitet. Die Ideen für oben genanntes Konzept bildete die Basis für die Entwicklung der drei Forschungsschwerpunkte „Wasserstoff und Anwendungen“, „Effiziente Gebäude“ und „Intelligente Energiesysteme“ durch die WL. Die Umsetzung erfolgte durch die Geschäftsstelle.

### *Koordination Strukturbildende Verbundprojekte*

Zur Stärkung der Vernetzung innerhalb des EnCN und zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurden acht strukturbildende Verbundprojekte definiert, an denen mindestens zwei Partner aus dem EnCN oder dessen wissenschaftlichen Umfeld, wie z.B. FAPS und NCT, teilnehmen. Die Geschäftsstelle hatte für diese Verbundprojekte die Projektträgerschaft übernommen, die Ausschreibung erstellt, die Bewerbungen koordiniert, Workshops organisiert und die Koordination der Gutachter übernommen. Weiterhin war sie in enger Abstimmung mit den beteiligten Partnern und dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kultur.

### *Corona-konformerer Geschäftsbetrieb am EnCN*

Zahlreiche Forschungsarbeiten am EnCN sind vom regelmäßigen Zugang zu den Laboren und Technika abhängig. Für die Sicherstellung der Arbeitsfähigkeit unter Pandemiebedingungen, hat die Geschäftsstelle, in Abstimmung mit der Wissenschaftlichen Leitung, ein Hygienekonzept erstellt und umgesetzt. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, notwendige Präsenztermine unter Einhaltung der Hygieneregularien durchzuführen. Für die Durchführung der vermehrt stattfindenden Online-Besprechungen und -veranstaltungen wurde zentral Equipment angeschafft, das von allen Akteuren im EnCN genutzt werden kann.

### *Unterstützung der Forschungsinfrastruktur*

Die Projekte Speicher A und Speicher B haben in der zweiten Förderperiode ein gemeinsames Technikum, das „Speicherhaus“, eingerichtet, in dem neuartige Energiespeichertechnologien im Technikumsmaßstab erforscht und betrieben werden. Das „Speicherhaus“ gibt Besuchern einen kompakten Überblick über Energiespeichertechnologien und deren mögliche Anwendungsfelder. Der von der Geschäftsstelle koordinierte Ausbau der technischen Infrastruktur im „Speicherhaus“ wurde 2020 fertiggestellt. Darüber hinaus hat die Geschäftsstelle verschiedene Infrastrukturmaßnahmen im Bereich Lüftung und Wasserversorgung für die Projekte Effizienz und die Solarfabrik organisiert.



*Abbildung 5: Übersicht „Speicherhaus“*

### *Vernetzung mit externen Projektpartnern*

Die Geschäftsstelle koordinierte verschiedene Aktivitäten und Workshops, um EnCN-Wissenschaftler mit potentiellen Projektpartnern zu vernetzen. Die seit 2014 bestehende Kooperationsvereinbarung zwischen dem Nürnberger Energieversorger N-ERGIE und dem EnCN wurde verlängert. Aus dieser Rahmenvereinbarung hat sich im Dezember 2020 ein erstes Projekt zum Screening von Wasserstoff-Technologien entwickelt.

Nach Round-Table-Gesprächen mit Forschungspartnern und Industriebetrieben in Wallonien 2018 folgte im Dezember 2019 ein zweitägiger Workshop in Brüssel. Neben den Wissenschaftlern beider Seiten waren zur direkten Unterstützung von Projektinitiativen jeweils ein Repräsentant der Bayerischen Forschungsallianz (BayFor) und des National Contact

Point (NCP) Wallonien eingebunden. Über diese Verbindung fand u.a. ein Austausch zu Kooperationsmöglichkeiten im Bereich der Wasserstoff- und Elektrolyse-Forschung statt.

Die 2019 mit der Firma Cenero gestarteten Gespräche über die gemeinsame Projektierung und Planung eines Wärmenetzes 4.0 auf dem AEG-Nordareal wurden erfolgreich weitergeführt und Ende 2020 ein gemeinsamer Forschungsantrag beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) eingereicht. Die Geschäftsstelle unterstützte die Projektentwicklung mit ihren Kontakten zu kommunalen Einrichtungen und zum Energieversorger N-ERGIE und holte den benötigten Letter of Intent (LOI) ein. Über dieses Projekt hinaus hat sich zwischen dem EnCN und Cenero noch ein weiterer Ansatz zur Erprobung neuer elektrischer Netze auf dem AEG-Südareal herauskristallisiert.

Die Firma Solar Edge baut ihre Deutschland-Repräsentanz in Nürnberg auf. Hier fanden erste Gespräche zu möglichen Kooperationen, insbesondere in den Bereichen PV und Elektromobilität, statt.

Ebenfalls Interesse an einer Kooperation in den Bereichen Effizienzsteigerung und Wasserstofftechnologien zeigte die Uniper Kraftwerke GmbH mit ihrem Standort Gebersdorf. Hier wurde im Oktober 2020 ein erster Austausch organisiert, der 2021 fortgesetzt wurde.

Im Herbst 2021 organisierte die Geschäftsstelle ein Gespräch mit der Firma Vitesco Technologies, mit dem Ziel eine mögliche Zusammenarbeit auf den Gebieten Antriebstechnik und Leistungselektronik im Automobilbereich auszuloten. Vitesco sucht in Nürnberg nach neuen Geschäftsfeldern und innovativen Lösungen und möchte deshalb mit Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Weitere Gespräche sind im ersten Quartal 2022 geplant.



Abbildung 6: Impressionen aus den Workshops mit Framatome (links) und Wallonien (Mitte und rechts)

Tabelle 1 – Vernetzungsaktivitäten für EnCN Wissenschaftler

Datum	Aktivität	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
2017	Envi Con & Plant Engineering GmbH	Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B Prof. Jürgen Karl, Speicher A
2017	Power and Air Condition Solution Management GmbH	Prof. Veronika Grimm, Energiemarktdesign Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B Prof. Martin März, Energiemanagement-Technologien Karlheinz Ronge, Energiemanagement-Technologien
2017/2018	MVV Energie AG	Prof. Alexander Martin, Energiemarktdesign Karlheinz Ronge, Energiemanagement-Technologien
2018	Innovations safari Framatome	Dr. Jens Hauch, Erneuerbare Energien Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B Dr. Bernd Wunder, Energiemanagement-Technologien
2018	Besuch Recom Services	Prof. Jürgen Karl, Speicher A
2018/2019	Partner-Workshop Wallonien (Tweed Cluster, Greenwin, CRM Group, Centexbel, Certech, u.a.)	Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Erneuerbare Energien Prof. Jürgen Karl, Speicher A Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B Prof. Wolfgang Krcmar, Effizienz Prof. Arno Dentel, Effizienz
2019/2020	Cenero, Wärmenetz 4.0 – AEG-Nordgelände, Reallabor AEG-Südgelände	Prof. Jürgen Karl, Speicher A Prof. Martin März, Energiemanagement-Technologien Prof. Matthias Luther, Netze Prof. Arno Dentel, Effizienz

Datum	Aktivität	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
2019	Bilfinger Noell, Schwefelhaltige Brennstoffe	Prof. Jürgen Karl, Speicher A Prof. Jürgen Wensing, Speicher B
2019	Stadtentwässerung Nürnberg	Prof. Jürgen Karl, Speicher A Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B
2020	EnCN-Kooperation mit Solar Edge	Prof. Christoph Brabec, Erneuerbare Energien Prof. Armin Dietz, Effizienz
2020	H <sub>2</sub> -Elektrolyse Demonstration in Brügge/Belgien	Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B
2020	Uniper, Effizienzmaßnahmen für Kraftwerk Franken	Prof. Veronika Grimm, Energiemarktdesign Prof. Peter Wasserscheid, Speicher B
2020	N-ERGIE Studie H <sub>2</sub> -Technologien, N-ERGIE Verlängerung Rahmenvertrag	Prof. Jürgen Karl, Speicher A Alle Beteiligten des EnCN
2021	Innovations- und Kooperationsgespräch Vitesco	Dr. Alexander Buchele, Geschäftsstelle EnCN
2021	Vorbereitung einer Studie über H <sub>2</sub> -Wertschöpfungsketten in der EMN	Prof. Veronika Grimm, Energiemarktdesign Prof. Reinhard German, Speicher Karlheinz Ronge, Energiemanagement-Technologien Weitere externe Partner

### EnCN-Sommerkonferenz

Die Sommerkonferenz mit Sommerfest ist eine jährliche Veranstaltung, die vor allem den persönlichen Austausch und das „Social-Networking“ zwischen den Mitarbeitern der unterschiedlichen Institutionen fördern soll. So waren die Themen der Konferenz in den Jahren sehr unterschiedlich ausgewählt. Sie reichten von Kurzpräsentationen einer Vielzahl von Projekten, über Posterausstellungen und Kick-off-Veranstaltungen der zweiten Förderphase sowie Workshops zu Zukunftsthemen bis hin zu konkreten Fragestellungen z.B. zur Nachhaltigkeit im Mobilitätssektor. Diese Art von fachlichem Austausch war ein guter Startpunkt für gemeinsame Projektideen unterschiedlicher Forschungseinrichtungen und Disziplinen. Im jeweils anschließenden Sommerfest konnten sich die Kolleginnen und Kollegen in ungezwungener Atmosphäre austauschen und weiter vernetzen. Infolge der Corona-Problematik organisierte die Geschäftsstelle im Jahr 2020 eine gemeinsame Open-Air Kinovorstellung. Die Sommerkonferenz war jedes Jahr sehr gut besucht und ein Highlight für die EnCN-Mitarbeiter.



Abbildung 7: Impressionen von der Sommerkonferenz mit Sommerfest

## 1.2 Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses

### EnCN Energiepreis

In Zusammenarbeit mit dem EnCN verlieh der Förderverein EnCN e.V. erstmals im Jahr 2017 den Energiepreis. Der Preis ist mit insgesamt 3.000 € dotiert und wird für exzellente Bachelor- und Master-Arbeiten aus den Gründerhochschulen des EnCN vergeben. Jährlich werden 5-6 Abschlussarbeiten prämiert. Dabei teilen sich die Gewinner die Prämie. Der Geschäftsstelle oblag gemeinsam mit der EnCN e.V. Geschäftsstelle die administrativen Aufgaben rund um den Preis, wie die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen, Sammlung und Sichtung der eingehenden Bewerbungen sowie die Juryarbeit. Die nachstehende Tabelle zeigt die Preisträger im Verlauf der zweiten EnCN-Förderphase.

Tabelle 2 – Preisträger des EnCN-Energiepreises

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
<b>2017</b>		
Tanja Schneider	Speicher	Allotherme Wasserdampfvergasung von Biomasse
Vanessa Krebs	Energiemarktdesign	On the uniqueness of competitive market equilibria on DC networks
Lars Nolting	Effizienz	Analyse der Einflussfaktoren auf die Effizienz von Wärmepumpen und Brennwertkesseln im Hinblick auf die europäischen Ökodesign- und Labelling-Richtlinien
Bastian Preller	Energiemanagement-Technologien	Regelung und Zustandsschätzung eines Modulare Multilevel Umrichters
Stefan Schmitt	Netze	Entwurf und Implementierung einer Modellbasierten Prädiktiven Regelung für den Modulare Multilevel-Umrichter
<b>2018</b>		
Daniela Sappa	Effizienz	Entwicklung eines modifizierten mineralischen Dünnbettmörtels mit verminderter Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit
Marco Blasius	Speicher	Hydrodynamische Untersuchungen in einem Coldflowmodell eines Plattendehydrierers
Christian Novak	Energiemanagement-Technologien	Erstellung eines Simulationsmodells für Gallium-Nitrid Leistungshalbleiterschalter
Florian Pol	Netze	Entwicklung der Steuerungssoftware für ein Lithium-Ionen basiertes Batteriespeichersystem
Philipp Runge	Energiemarktdesign	Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenen Wasserstoffes für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035
Sebastian Strohm	Erneuerbare Energien	Bulk Heterojunction Solar Cells Based on P3HT and the Non-Fullerene Acceptor IDTBR
<b>2019</b>		
Busch, Kevin	Netze	Entwurf und Umsetzung einer Leit- und Steuerungssoftware für Mikronetze
Krieg, Jacob	Effizienz	Entwicklung einer Software zur nutzerspezifischen Visualisierung von Produktionskennzahlen in einem Druckgussbetrieb
Markthaler, Simon	Speicher	Modellbildung und Simulation eines Mehrphasenmodells zur Analyse der biologischen Methanisierung in Rieselbettreaktoren
Quergfelder, Simon	Energiemanagement-Technologien	Inbetriebnahme eines 3-Level-Umrichters zur Untersuchung verschiedener Ansteuerverfahren und deren Einfluss auf Stromqualität und Spannungssymmetrie
Scholl, Moritz	Erneuerbare Energien	Entwicklung eines neuen Schichttransferverfahrens bei der Floating Film Transfer Method (FTM) für die automatisierte Überlagerung von P3HT:PCBM-Schichten
Thürauf, Johannes	Energiemarktdesign	Discrete Selection of Diameters for Constructing optimal Hydrogen Pipeline Networks

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
<b>2020</b>		
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
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 <sub>2</sub> -Bepreisung in Europa in Ergänzung zum EU-ETS
<b>2021</b>		
Denis Welsch	Effizienz	Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation der Nachlaufströmung eines Drallerzeugers mittels LDA und CFD
Adrian Würz	Speicher	Kohlenstoffgetragertes Mg(OH) <sub>2</sub> /MgO-System für die thermochemische Energiespeicherung
Ezgi Nur Güler	Erneuerbare Energie	Development of Solution-Processed Bottom Electrodes for OPV Modules
Johannes Gehring	Energiemanagement-Technologien	Entwicklung und Charakterisierung einer Dual-Active-Bridge mit GaN-Transistoren
Kiana Niazmand	Energiemarktdesign	Techno-economic Analysis on Importing Green Ammonia to Germany Case Study for Australia
Margarita Borovoj	Netze	Analyse der Momentanreserve am Kraftwerk Franken - mögliche Zukunftsperspektive für Bestandskraftwerke



Abbildung 8: Gewinner des EnCN-Energiepreis

### Reisestipendium

Der Förderverein EnCN e.V. vergibt seit 2019 Reisestipendien, um Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler zu motivieren und zu ermutigen, ihre Forschungsergebnisse auf internationalen Konferenzen vorzustellen und zu diskutieren. Positiven Effekt hat dies auch für den EnCN, der dadurch international bekannt gemacht wird. Die Initiative wurde positiv aufgenommen, so dass im selben Jahr bereits 5 Stipendien in Höhe von jeweils 300 € vergeben werden konnten. Infolge der Corona-Problematik konnten in den Jahren 2020 und 2021 leider keine Reisestipendien ausgelobt werden.

Tabelle 3: Preisträger des EnCN-Reisestipendiums 2019

Name	Forschungsbereich	Veranstaltung, Art der Präsentation
Bollmann, Jonas	Speicher	Thermodynamik-Kolloquium 2019 (Duisburg), Vortrag
Dettelbacher, Johannes	Effizienz	18. ASIM Fachtagung - „Simulation in Produktion und Logistik“ (Chemnitz), Vortrag mit Full Paper
Eppinger, Bernd	Speicher	Thermodynamik-Kolloquium 2019 (Duisburg), Vortrag
Gerstner, Michael	Effizienz	45 <sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Lissabon), Vortrag
Steger, Daniel	Speicher	5 <sup>th</sup> International Seminar on ORC Power Systems (Athen), Vortrag

### 1.3 Öffentlichkeitsarbeit

#### Veranstaltungen

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit beteiligte sich der EnCN jedes Jahr aktiv auf verschiedenen Veranstaltungen.

Tabelle 4 – Übersicht Messen, Konferenzen und Veranstaltungen für die Öffentlichkeit

Veranstaltungen	2017	2018	2019	2020	2021
Handelsblatt Jahrestagung Energie	Messestand Experten- gespräch Prof. Grimm	Messestand			
Hannover Messe	Messestand	Messestand	Messestand		online
E-World			Messestand	Messestand	
iSEnEC		Messestand Vorträge			
Konferenz Doha	Vorträge				
NUE Dialog			Messestand		
Stadt(ver)führungen		Führungen			Führungen
Lange Nacht der Wissenschaften	Führungen Ausstellung		Führungen Ausstellung		
	Vorträge		Vorträge		Vorträge
EnCN Jahreskonferenz	Vorträge	Vorträge	Vorträge	Vorträge	Vorträge
Jubiläums Fachveranstaltung Wasserstoff und Anwendungen					Vorträge



Abbildung 9: Impressionen von verschiedenen EnCN-Veranstaltungen

### Online-Veranstaltungsformat Ask me anything

In den Corona-Zeiten stand vor allem die Entwicklung digitaler Veranstaltungsformate im Fokus, um auch in dieser Zeit Kontakt mit dem EnCN-Netzwerk zu halten. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen von Faszination Energie das Veranstaltungsformat „Ask me Anything“ entwickelt. Kern des Formats ist eine offene Diskussion mit EnCN-Wissenschaftlern und Partnern aus der Wirtschaft, bei der die Zuschauer beliebig Fragen stellen können. Die Moderation wurde von der Geschäftsstelle Herrn Dr. Buchele durchgeführt. 2020 wurde zu den Themen Wasserstoff und PV diskutiert und 2021 zu den Themen Gebäude und Elektromobilität. Alle Veranstaltungen sind auf dem YouTube Kanal des EnCN verfügbar, um eine größere Reichweite und Interesse für den EnCN zu erzielen.

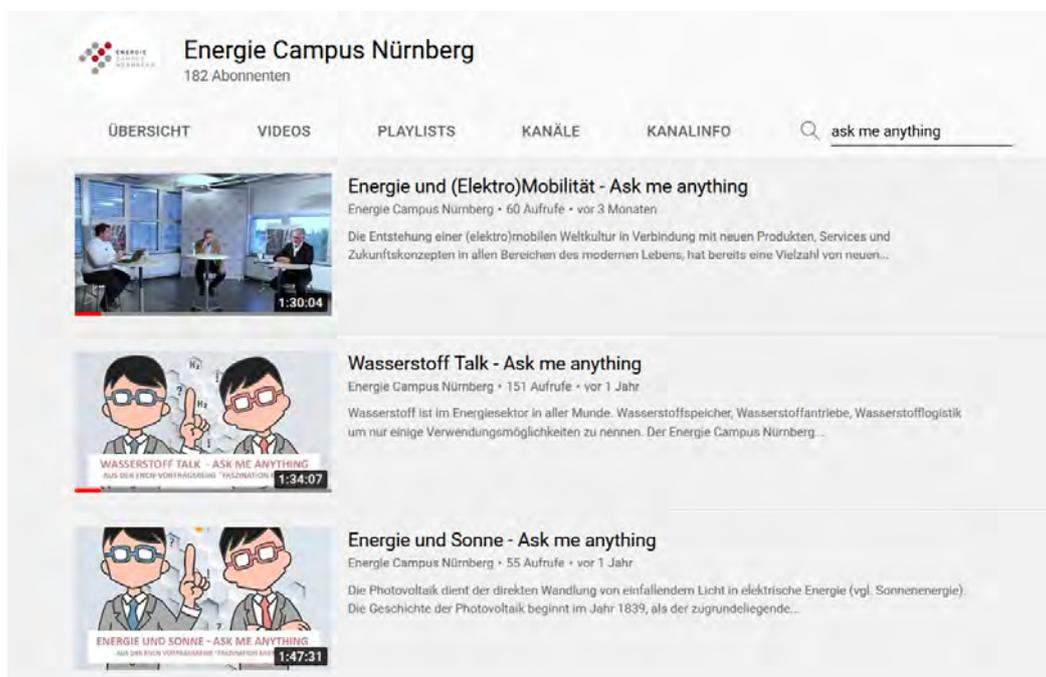


Abbildung 10: Ausschnitte aus dem EnCN YouTube Kanal „Ask me anything“

## Videos

Um die Ergebnisse der verschiedenen Forschungsvorhaben für die Öffentlichkeit leichter zugänglich zu gestalten, wurden seit 2018 verschiedene Forschungsvideos produziert, um visuell in die Themenstellungen einzuführen. Für den EnCN als Forschungskooperation, aber auch für jeden einzelnen Forschungsbereich, gibt es ein eigenes Video. Alle Videos sind auf dem EnCN YouTube Kanal verfügbar. Dabei wird dem Video über die Wasserstoff-Forschung mit über 10.000 Klicks das größte Interesse entgegengebracht.

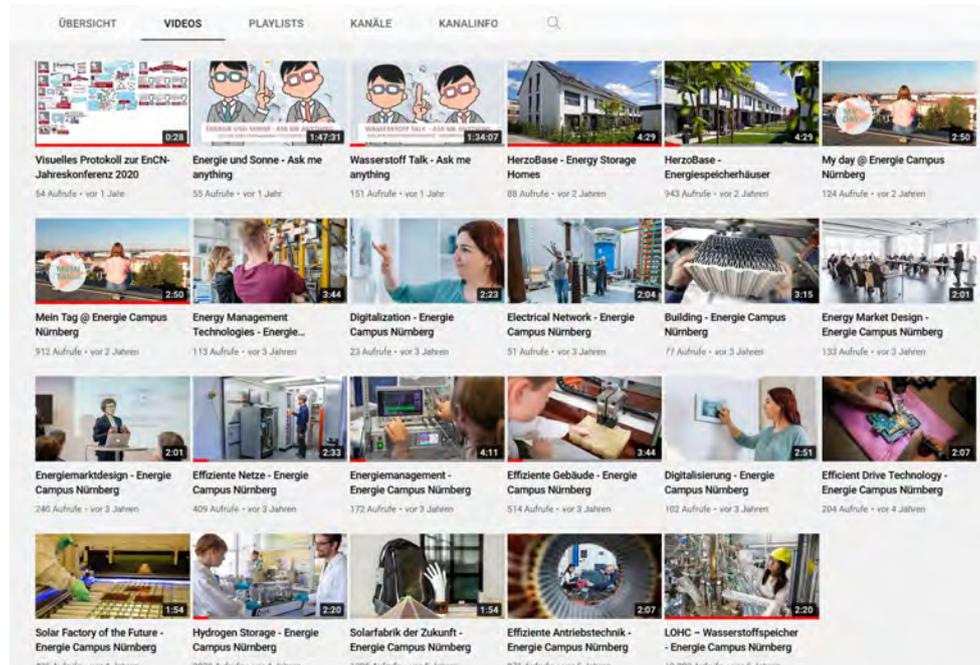


Abbildung 11: Ausschnitt aus dem EnCN YouTube Kanal

## Fotoserie „Forschung im rechten Licht“

In den verschiedenen EnCN-Forschungsvorhaben kommt häufig spezielle und hochentwickelte Forschungsausstattung zum Einsatz. Viele der verwendeten Anlagen sind Eigenentwicklungen und wurden speziell für die Projekte konzipiert und aufgebaut. Im Rahmen eines Fotoprojekts wurden diese Installationen ins rechte Licht gerückt und öffentlich wirksam dargestellt. Die Bilder werden für die Öffentlichkeitsarbeit in den jeweiligen Forschungsbereichen genutzt.

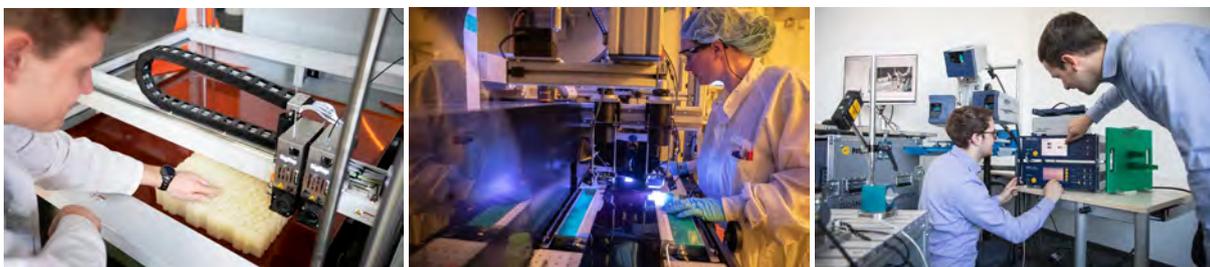


Abbildung 12: Auswahl an Bildern der Fotoserie

### Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten sowie dessen Forschungsthemen und Veranstaltungen waren im Berichtszeitraum mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse. 2019 wurde das Zentrum Wasserstoff.Bayern gegründet. Aus diesem Anlass wurde der EnCN häufiger erwähnt als in den Jahren zuvor.

Tabelle 5 – Presseübersicht

Zeitung	2017	2018	2019	2020	2021
Bayerische Gemeindezeitung			2	1	
Bayerische Rundschau			1	1	
Bayerische Staatszeitung			7	3	1
Bote vom Haßgau			1		
Coburger Tageblatt			1		
DIE KITZINGER			1		
Frankenpost			2		
Fränkischer Tag	2	2	4	2	
Handelsblatt				1	
Handelsblatt online				1	
IZ Aktuell		1			
Landshuter Zeitung			1		
Main-Post			1		
Mittelbayerische Zeitung	1		5	1	2
Münchner Abendzeitung			1		
Münchner Merkur			2		
Neue Presse Coburg			2		
Nordbayerischer Kurier			4		
Nürnberger Nachrichten	7	5	17	5	5
Nürnberger Stadtanzeiger		6	2	2	
Nürnberger Zeitung	2	12	17	5	5
Passauer Neue Presse			1		3
Saale-Zeitung			1		
Schwäbische Zeitung			3		
Schweinfurter Tagblatt			1		
Straubinger Tagblatt			1		
Süddeutsche Zeitung	1		1		
taz. Die Tageszeitung			1		
Volkszeitung Schweinfurt			1		
WELT ONLINE			3		
Wirtschaftszeitung	1		2		
<b>Summe</b>	<b>14</b>	<b>26</b>	<b>86</b>	<b>22</b>	<b>16</b>

## 1.4 Organisation

Die Geschäftsstelle des EnCN bestand aus 4 Mitarbeitern: dem Geschäftsführer Dr. Alexander Buchele, der Assistentin Ioanna Dimopoulou, dem Gebäudemanager Wolfgang Schlaffer und der Projektmanagerin Kristin Zeug. Zusätzlich unterstützen zwei wechselnde studentische Mitarbeiter die Arbeit der Geschäftsstelle. Die Trägerschaft der Geschäftsstelle geht zum 1.1.2022 an die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg über, da der derzeitige Träger das ZAE Bayern zum 31.12.2021 aufgelöst wird.



Abbildung 13: Mitarbeiter der Geschäftsstelle des Energie Campus Nürnberg  
(v.l.n.r. Wolfgang Schlaffer, Ioanna Dimopoulou, Kristin Zeug, Alisa Zellner, Dr. Alexander Buchele)

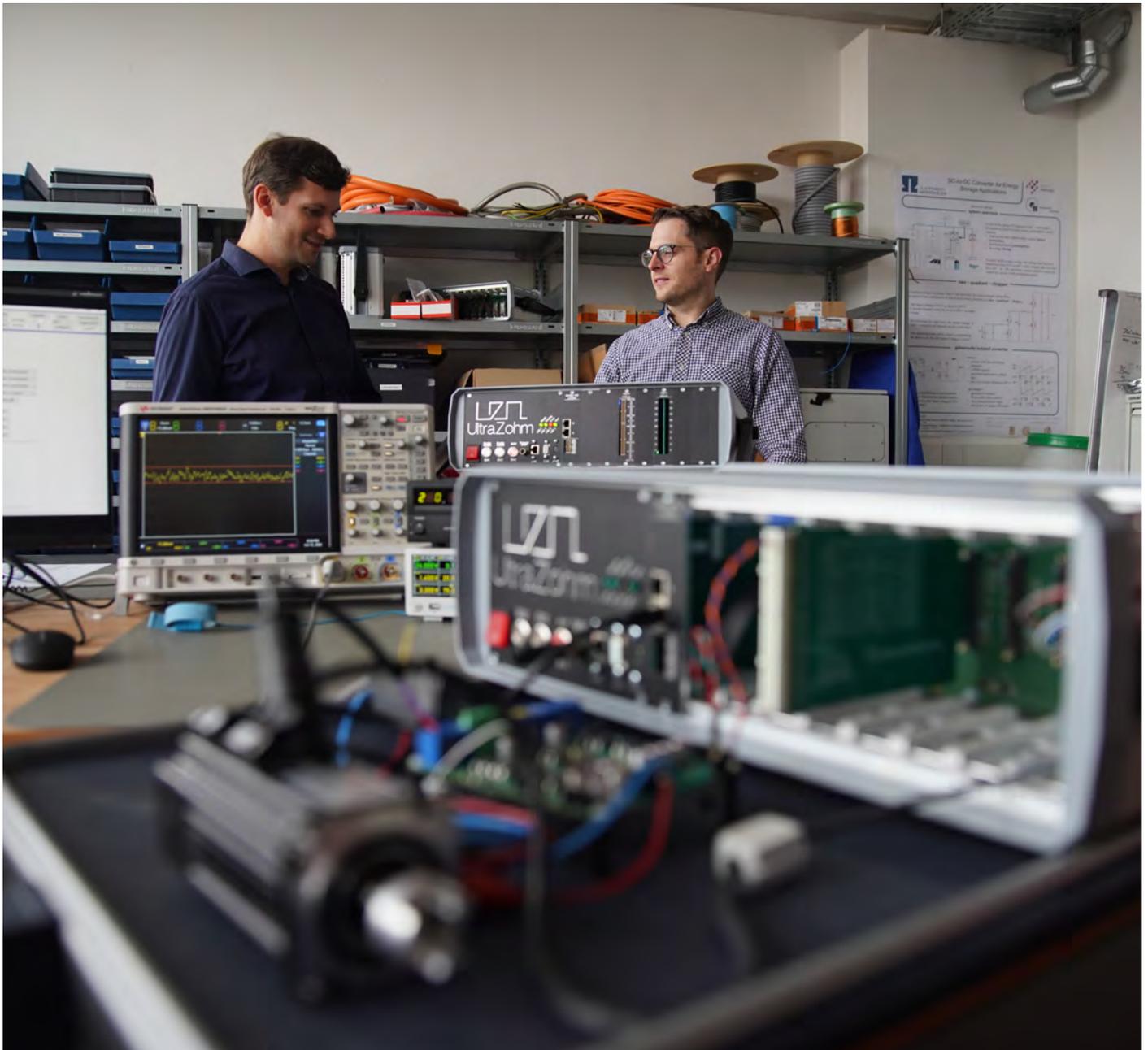
## 2 Schlussworte

Die im Jahresbericht dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die zweite Förderperiode für den EnCN sehr erfolgreich gelaufen ist und die Corona-Pandemie glücklicherweise nur zum Teil Auswirkungen auf die Arbeitsfähigkeit in den verschiedenen Forschungsbereichen ausübte. Ende des Jahres 2021 endet die zweite Förderperiode des EnCN. Um den Erfolg des EnCN auch über das Jahr 2021 hinaus sicherzustellen, müssen die im Strategiekonzept des Evaluationsberichts dargestellten Maßnahmen zeitnah und verbindlich umgesetzt werden. Ab 1.1.2022 wird die Geschäftsstelle nicht nur für den EnCN tätig sein, sondern auch Aufgaben bei der Verwaltung des Nuremberg Campus of Technology (NCT) übernehmen. Im Zuge dieser Aufgabenerweiterung wurde an der Geschäftsstelle auch eine zusätzliche Stelle für einen Wissenschaftskoordinator geschaffen. Durch diese Erweiterung soll zukünftig die Möglichkeit zur Akquise größerer Verbundprojekte aus der Geschäftsstelle heraus gestärkt werden.

Im Zuge dieser Neuaufstellung der Geschäftsstelle kommt es auch zu einem größeren personellen Wechsel. Dr. Buchele, Frau Dimopoulou und Herr Schlaffer verlassen die Geschäftsstelle. Markus Rützel wird neuer Geschäftsführer, Dr. Thomas Pircher übernimmt die Aufgabe des Wissenschaftskoordinator und Frau Zarrabi wird ab 01.03.22 neue Assistentin der Geschäftsstelle.

FORSCHUNGSBEREICH

# Effizienz



Sprecher des Forschungsbereichs

**Prof. Dr. Wolfgang Krcmar**  
Technische Hochschule Nürnberg  
Fakultät Werkstofftechnik

E-Mail  
[Wolfgang.Krcmar@th-nuernberg.de](mailto:Wolfgang.Krcmar@th-nuernberg.de)

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

Web  
[www.encn.de/effizienz](http://www.encn.de/effizienz)

# EFFIZIENZ

## Projektbericht 2017- 2021

Ein verantwortungsvoller Umgang mit Energie und Ressourcen erfordert eine Verbrauchsminimierung durch maximale Energieeffizienz. Die Steigerung der Energieeffizienz trägt zu allen Zieldimensionen der Energiepolitik – der Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit – bei und ist eine tragende Säule der Energiewende.

Im 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 Fassade-systeme 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 Energiespeicher-häusern mit KfW Standard 40 Plus den Beweis erbracht, dass für energieeffiziente Gebäude sowohl die passiven, als auch die aktiven Komponenten notwendig 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@th-nuernberg.de

**Telefon**  
+49 911 / 5880-1173 bzw. -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

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 nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele. Das Ziel besteht praktisch immer in der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit der Wandbau- und Isolierstoffe gegenüber dem Stand der Technik. Gebäude, die mit besser gedämmten Werkstoffen in der Gebäudehülle gebaut bzw. saniert werden, zeichnen sich durch einen geringeren Energieverbrauch aus. Dies führt zur Einsparung von Primärbrennstoffen für die Gebäudebeheizung mit einhergehender Absenkung unnötiger CO<sub>2</sub> – 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 (2021) 1 Doktorandin und 5 Doktoranden innerhalb von Forschungsprojekten an ihren Promotionen. Darüber hinaus waren ständig ca. 15 Studierende als Wissenschaftliche Hilfskräfte in die Arbeitsgruppe integriert und konnten die erarbeiteten Ergebnisse für ihre Projektarbeiten, Bachelor- und Masterarbeiten nutzen. Im Jahr 2021 hat die Arbeitsgruppe insgesamt 2.229.240 € an Drittmitteln eingeworben. In den vergangenen 5 Jahren wurden u.a. 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.
- „TOGRA: Erforschung ressourcen- und energieeffizienter Ziegel“; PTJ-FKZ NW-1303-0007; abgeschlossenes Projekt.
- „Neuartige Trocknungsverfahren von keramischen Formlingen“; ZIM Verbundprojekt KF 2151802SU4; abgeschlossenes Projekt.
- „Herzo Base - Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; PTJ-FKZ 03ET1364A; abgeschlossenes Projekt.
- „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Absenkung des Emissionskoeffizienten“; Bilaterale Forschungsarbeiten in Zusammenarbeit mit der 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“; laufendes EU-Projekt.
- „Herzo Opt – Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“; PTJ-FKZ 03ET1641 A; laufendes Projekt.

- „Validierung des Herstellungsprozesses von RC-Produkten aus Bau-Reststoffen“; Bayern Innovativ; Kooperationsprojekt mit Prof. Dr. Teipel, Fakultät Verfahrenstechnik der TH Nürnberg; laufendes Projekt.
- „GeoZeo: Machbarkeitsstudie zur Herstellung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper durch Hydrothermalsynthese aus Geopolymeren“; Vorlauftforschung der TH Nürnberg; laufendes Projekt.
- „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“; laufendes ZIM Kooperationsprojekt.
- „Versuchsbetrieb eines gasbefeuerten Wirbelschicht-Sinterofens für keramische Elektronikbauteile kleinster Abmessungen“, STAEDTLER-Stiftung Nürnberg, laufendes Projekt.

#### *Neu beantragte Projekte:*

- „Herstellung und Charakterisierung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren zur Anwendung in Sorptionsspeichern“; Forschungsantrag „Strukturbildende Verbundprojekte“, Forschungsphase III am EnCN, eingereicht 1/2022.
- „Herstellung von Zement-Ersatzbaustoffen aus Sekundärrohstoffen auf Basis von Geopolymer-Produkten zur Reduzierung von Immissionen“; eingereicht im 7. Energieforschungsprogramm des BMWI, 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*

#### **Einleitung**

Vor dem Hintergrund des immer deutlicher zu Tage tretenden Klimawandels hat die Bundesregierung ambitionierte Klimaschutzziele für die kommenden Jahrzehnte gesetzt. Eines der Kernziele ist dabei die Verringerung des Primärenergieverbrauchs von Gebäuden, welcher bis zum Jahr 2050 um 80 % reduziert werden soll. Um dieses Ziel zu erreichen sind immense Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz von Gebäuden notwendig. Die wichtigste Stellschraube ist dabei die Verbesserung der Gebäudedämmung. Dies wird beim Betrachten des Wohngebäudesektors ersichtlich: In einem typischen Wohnhaus entfallen etwa 64 % des Gesamtenergieverbrauchs auf die Beheizung der Wohnfläche. So wurden im Jahr 2018 allein für das Beheizen von Wohngebäuden etwa 464 TWh an Gesamtenergie benötigt. Um eine Verbesserung der Wärmedämmung zu erzielen, ist die Ausrüstung der Gebäudehüllen mit geeigneten Wärmedämmschichten notwendig.

Die Ziegelindustrie hat sich dieser Herausforderung bereits seit vielen Jahren gestellt, indem sie ihre Produkte u.a. in wärmedämmender Hinsicht weiterentwickelt hat. Die Verbesserung erfolgte neben der Porosierung des Ziegelscherbens und der Optimierung der Lochbild-Geometrie insbesondere durch das Verfüllen der Lochbilder mit Dämmstoffen auf Basis von Perliten (hochporöse vulkanische Gläser) bzw. Mineralfasern (Abbildung 1). Diese „klassischen“ Dämmstoffe zeichnen sich durch Wärmeleitfähigkeiten aus, die typischerweise bei Werten von  $\lambda \geq 0,035$  W/mK liegen. Eine darüber hinausgehende Verbesserung des Wärmedämmvermögens verfüllter Ziegel kann nur dann erfolgen, wenn zukünftig innovative Dämm- bzw. Füllstoffe diese Werteschwelle deutlich unterschreiten.



Abbildung 1: Die derzeit in industrieller Verwendung befindlichen Ziegelfüllmaterialien Perlite (A) und Mineralfaserwolle (B) sowie das in Entwicklung befindliche Füllmaterial Silica-Aerogel in seiner Granulatform (C).

## Zielstellung

Silica-Aerogele stellen einen vielversprechenden Kandidaten für einen solchen innovativen Dämmstoff dar (Abbildung 1). Die Wärmeleitfähigkeit von  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen beträgt bei geeigneten Herstellungsbedingungen weit weniger als  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ . Darüber hinaus sind sie luftdurchlässig, unbrennbar und gesundheitlich unbedenklich. Allerdings weisen  $\text{SiO}_2$ -Aerogele auch einige wenige Nachteile auf, wobei dabei insbesondere die niedrige mechanische Belastbarkeit und das ausgeprägte Sprödebruchverhalten zu nennen sind, die das Handling von größeren Aerogel-Körpern ( $> 4 \text{ mm}$ ) äußerst schwierig machen und einer Verwendung als Dämmstoff entgegen stehen. Gelingt die mechanische Stabilisierung von  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen, können diese in monolithischer Form als Füllkörper für Hochlochziegel verwendet werden.

Im Projekt „NanoFIM“ - Höchstwärmedämmende Nanofaserisoliationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ (PTJ-FKZ 03SF0543B) erfolgte daher unter anderem die Entwicklung eines neuartigen Dämmstoff-Komposits aus kurzen Polystyrol-Nanofasern (PS-Nanofasern) und  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen. Dazu wurde von einem Projektpartner in der Kreislaufwirtschaft anfallendes Alt-Styropor in Lösung gebracht und mittels „Electrospinning-Verfahren“ zu PS-Nanofasern versponnen. Die so hergestellten Nano-Langfasern wurden im Energie Campus Nürnberg zu Nano-Kurzfasern zerkleinert und in eigens entwickelte  $\text{SiO}_2$ -Aerogele integriert. Das Ziel bestand dabei in der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der  $\text{SiO}_2$ -Aerogele, ohne deren thermische Eigenschaften negativ zu beeinflussen.

## Entwicklung einer geeigneten Synthese-Route zur Herstellung monolithischer $\text{SiO}_2$ -Aerogele

Die Synthese von  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen erfolgt typischerweise in drei Stufen: Die erste Stufe umfasst einen Sol-Gel-Prozess, bei welchem flüssige Precursor-Moleküle, wie Tetraethoxysilan (TEOS) eine Abfolge von Hydrolyse und anschließender Polykondensation durchlaufen und dabei ein offenporöses Gel, das sogenannten Alkogel, ausbilden (Abbildung 2). Die zweite Stufe umfasst eine Hydrophobierung der Geloberfläche; typischerweise durch den Einsatz von Trimethylchlorsilan (TMCS) oder Hexamethyldisilazan (HMDS). Bei der dritten und letzten Stufe handelt es sich um einen speziellen Trocknungsprozess in einem Autoklaven, bei dem überkritisches  $\text{CO}_2$  zum Einsatz kommt.

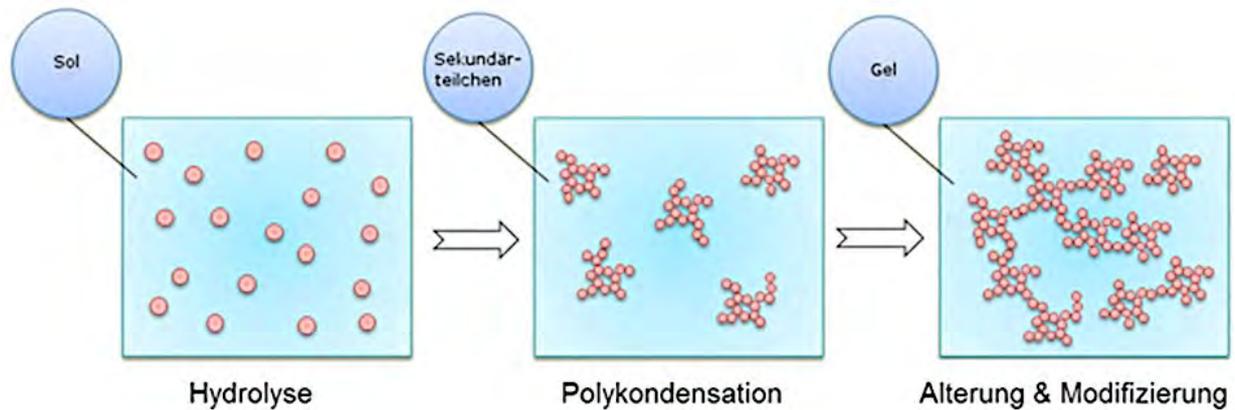


Abbildung 2: Schematischer Ablauf des Sol-Gel-Prozesses für die Synthese von  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen. Das aus einem organischen Silica-Precursor und Ethanol bestehende Sol wird durch Zugabe eines sauren Katalysators zunächst hydrolysiert und durchläuft anschließend durch das Verschieben des pH-Wertes in den basischen Bereich eine Polykondensationsreaktion. An deren Endpunkt verfestigt sich das Sol schließlich zum Gel.

Um PS-Nanofasern in  $\text{SiO}_2$ -Aerogel-Monolithen zu integrieren, muss die Syntheseroute folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die Einbindung nanoskaliger PS-Kurzfasern muss noch während des Sol-Gel Prozesses möglich sein
- Die Syntheseroute muss monolithische  $\text{SiO}_2$ -Aerogele hervorbringen
- Die  $\text{SiO}_2$ -Aerogele müssen in hydrophobierter Form vorliegen
- Die Nano-Fasern dürfen weder durch den Sol-Gel Prozess, noch durch die Hydrophobierung geschädigt werden

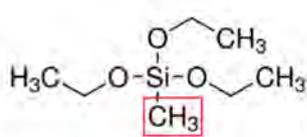
Da diese Voraussetzungen durch bisherige Syntheserouten nicht erfüllt werden, war die Entwicklung alternativer Herstellungsverfahren notwendig. Hierzu wurden in den ersten beiden Projektjahren zahlreiche Syntheserouten erprobt, wobei verschiedene Prozess- und Stoffparameter variiert wurden.

Dabei wurde ein neuartiges Syntheseverfahren entwickelt, welches alle oben genannten Voraussetzungen erfüllt. Diese Synthese basiert auf einem Sol-Gel Prozess mit nachgeschalteter, zweistufiger Hydrophobierung (Abbildung 3). Dabei kommen sowohl hydrophobe Co-Precursoren, wie Methyltriethoxysilan (MTES) als auch sekundäre Hydrophobierungsmittel auf Basis von Ethoxytrimethylsilan (ETMS) zum Einsatz.

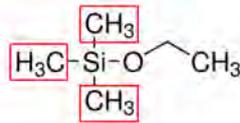
Hierdurch gelingt die reproduzierbare Herstellung mechanisch stabiler monolithischer  $\text{SiO}_2$ -Aerogele sowie Aerogel-Nanofaser-Komposite, die sich durch eine äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit von nur  $\lambda = 0,020 \text{ W/mK}$  und ausgeprägte hydrophobe Eigenschaften auszeichnen (Abbildung 4). Des Weiteren weisen die so hergestellten  $\text{SiO}_2$ -Aerogele eine sehr geringe Rohdichte von  $\rho = 0,16 \text{ g/cm}^3$  sowie eine große innere Oberfläche von fast  $1200 \text{ m}^2/\text{g}$  auf. Die nanoskaligen PS-Kurzfasern werden während der Synthese dem noch flüssigen Aerogel-Ansatz zugefügt und dabei ausreichend homogen in die Aerogel-Matrix eingebettet (Abbildung 5). Das „Handling“ der mit nanoskaligen PS-Kurzfasern ausgerüsteten  $\text{SiO}_2$ -Aerogele war bereits bei ersten haptischen Tests den unverstärkten  $\text{SiO}_2$ -Aerogelen sehr deutlich überlegen.

## 2-stufiges Hydrophobierungsverfahren

CP-F						
Volumenbasierte Rezeptur in ml:						
TEOS	MTES	ETOH	H <sub>2</sub> O (acid) Oxalsäure 0,01M	H <sub>2</sub> O (base) NH <sub>4</sub> OH 5M	Gesamt:	
5,00	2,26	9,85	1,50	1,20	19,81	
<b>Zugabe von 0,100 g PS-Nanofasern (10 % MA) in Form von Kurzfasern</b>						



Hydrophober Coprecursor  
**MTES**



Sekundäres Hydrophobierungsmittel  
**ETMS**

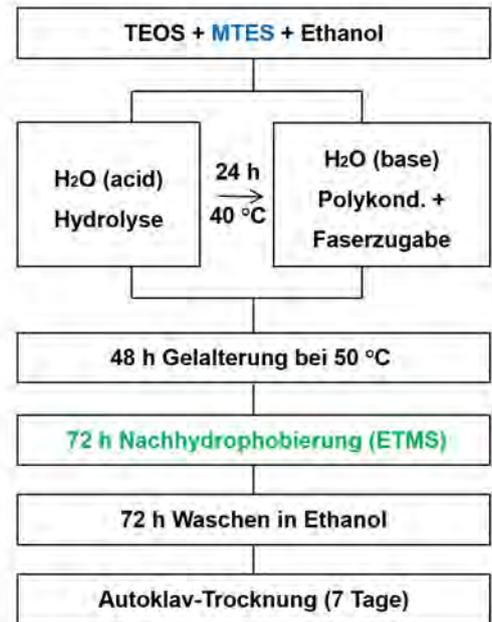


Abbildung 3: Übersicht über die Rezeptur sowie den Ablauf der Synthese von mit PS-Nanofasern verstärkten SiO<sub>2</sub>-Aerogelen. Die ausgeprägten wasserabweisenden Eigenschaften der Aerogele wurden durch den kombinierten Einsatz von hydrophoben Co-Precursoren sowie durch einen nachgeschalteten, sekundären Hydrophobierungsschritt erzielt.

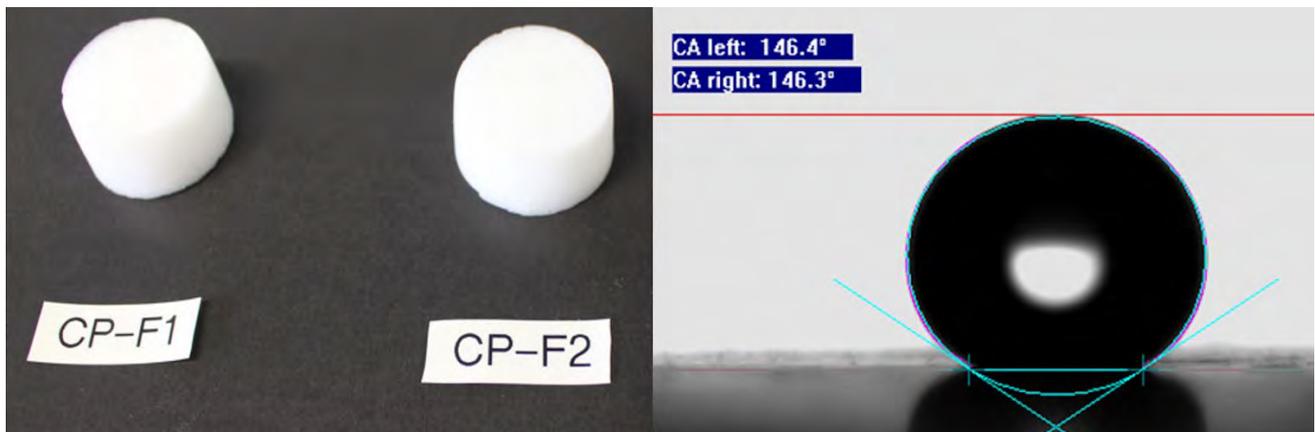


Abbildung 4: Links: Mit kurzen PS-Nanofasern verstärkte SiO<sub>2</sub>-Aerogele zeigen aufgrund des mechanischen Verstärkungseffektes ein deutlich verbessertes "Handling" im Vergleich zu den unverstärkten SiO<sub>2</sub>-Aerogel-Nullproben. Rechts: Kontaktwinkelmessungen an der Oberfläche der SiO<sub>2</sub>-Aerogel-Nullproben sowie der faserverstärkten Pendants ergaben jeweils Werte von über 145°.

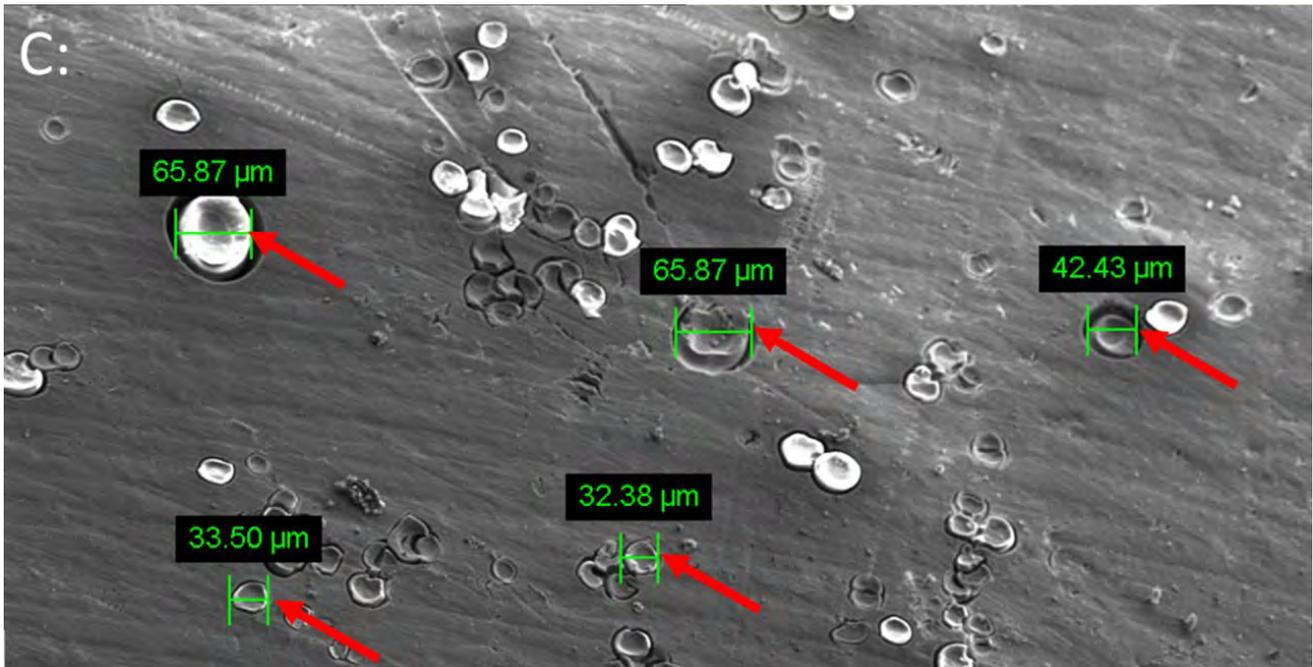


Abbildung 5: REM-Aufnahme der durch Scherung erzeugten Bruchfläche eines nanofaserverstärkten  $\text{SiO}_2$ -Aerogels. Die abgescherten Enden der eingebundenen Polystyrol-Nano-Fasern sind deutlich zu erkennen.

Zukünftig soll der optimale Fasergehalt durch Versuchsreihen mit unterschiedlich hohen Faseranteilen ermittelt werden. Darüber hinaus soll das Interface zwischen Aerogelmatrix und den Polystyrolfasern verbessert werden, indem die Polystyrolfasern mit einem Massenanteil von 10 % Maleinsäureanhydrid ausgerüstet werden. Die Maleinsäureanhydrid-Gruppen können anschließend durch geeignete Reaktionen mit Aminosilanen, wie beispielsweise 3-Aminopropyltriethoxysilan (APTES), als „Andockstellen“ zwischen Faser und Aerogelmatrix dienen und somit den mechanischen Verstärkungseffekt der Faserzugabe weiter erhöhen.

### 1.1.2 Entwicklung einer Wärmedämmbeschichtung für hochwärmedämmende Wandbaustoffe“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik; M.Eng. K. Zeyer, B.Eng. M. Wanninger, B.Eng. M.D.A. Pohan, M.Eng. C. Heckel, M.Eng. J.S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar

#### Einleitung und Aufgabenstellung

Ziel des vorgestellten Forschungsprojekts ist die Applikation und Anwendung einer neuartigen Wärmedämmbeschichtung auf Ziegelkeramik. Durch den Einsatz einer Infrarot-Reflexbeschichtung auf den keramischen Oberflächen im inneren Lochbild von Hochlochziegeln, ist es möglich, den an der Wärmeübertragung beteiligten Strahlungsanteil zu senken. Im Rahmen des Vorhabens wurden bei 16 hochwärmedämmenden Mauerziegel-Sorten von insgesamt 14 Projektpartnern aus der Ziegelindustrie eine in der Arbeitsgruppe neu entwickelte, leistungsstarke Infrarot-Reflexbeschichtung auf den inneren Lochbildoberflächen von Hochlochziegeln appliziert. Beschichtete Labor- und industriell hergestellte Großziegel wurden auf ihre Emissionskoeffizienten sowie äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten untersucht und mit den entsprechenden Werten unbeschichteter Ziegel verglichen. Zur Beurteilung, ob beschichtete Hochlochziegel am Ende ihrer Nutzungsphase in den Stoffkreislauf des Bauschutt-Recyclings integriert werden können, wurden Eluat-Analysen im Hinblick auf die Deponieverordnung durchgeführt. Um mögliche negative Einflüsse der Beschichtung auf das Brandverhalten bzw. auf die Feuerwiderstandsfestigkeit sowie die Entstehung möglicher Rauchemissionen zu erhalten, wurden entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Diese können als erste Entscheidungshilfen für eine angestrebte bauaufsichtliche Zulassung beschichteter Hochlochziegel herangezogen werden.

## Experimentelle Arbeiten

Die von den Ziegelwerken zur Verfügung gestellten Hochlochziegel wurden zunächst im Trockenschrank bei 105 °C rückgetrocknet. Im Anschluss wurden diese gewogen und die Abmessungen L x H x B ermittelt, um mit den Daten die Ziegelrohndichten zu ermitteln. Für die Applikation der Beschichtung wurde der Prototyp einer Ziegel-Beschichtungsanlage verwendet (Abbildung 6).



Abbildung 6: Prototyp einer Ziegelbeschichtungsanlage mit Ansetzbehälter zur Herstellung der Pigment-Suspension.

Die zu beschichtenden Hochlochziegel werden auf ein trichterförmig erweitertes und mit Moosgummi abgedichtetes Ziegel-Auflager aufgesetzt. Das vom Trichter nach unten verlaufende Fallrohr endet in der Pigment-Suspension, bestehend aus VE-Wasser, einem Metalleffekt-Pigment, einem Dispergiermittel sowie einem Bindemittel, die im Ansetzbehälter homogenisiert und mittels Doppelmembranpumpe in den Ansaugbehälter gefördert wird. Auf die Ziegeloberseite wird ebenfalls eine mit Moosgummi abdichtende, bewegliche Rohrleitung pneumatisch abgesenkt. Mittels einem Vakuumverdichter wird ein Unterdruck erzeugt, wodurch die Suspension durch das Fallrohr und den Hochlochziegel nach oben angesaugt wird und dabei die Innenflächen des Ziegel-Lochprofils benetzt. Wenn die zu beschichtende Ziegelhöhe erreicht ist, wird das Teilvakuum aufgehoben, so dass die überschüssige Suspension wieder in den Vorratsbehälter zurückfließen kann. Zur Entnahme des beschichteten Ziegels wird die pneumatische Rohrleitung angehoben, so dass der Ziegel entfernt werden kann. Die beschichteten Ziegel werden im Anschluss bei 105 °C im Trockenschrank rückgetrocknet.

## Analytik

### Bestimmung des Emissionskoeffizienten

Zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten wurde ein System bestehend aus einem Pyrometer und einem Hohlraumstrahler verwendet. Zur Berechnung des Emissionskoeffizienten wurde das Signal des Hohlraumstrahlers bei Raumtemperatur und bei 100 °C sowie das Reflexsignal der durch den Hohlraumstrahler bestrahlten und der nicht bestrahlten Probe gemessen (Abbildung 7).

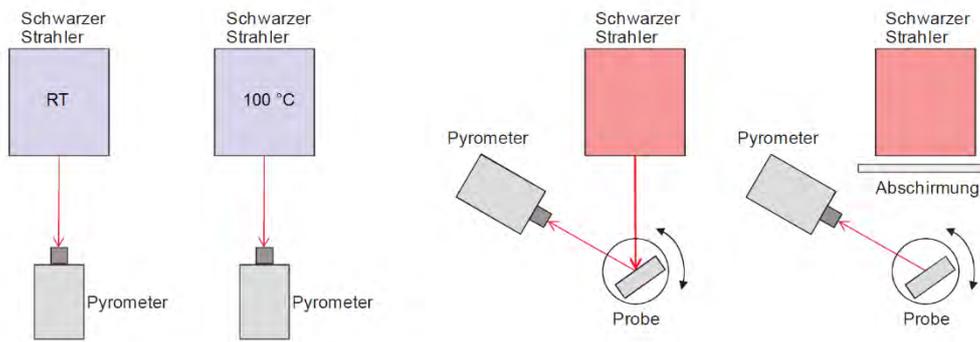


Abbildung 7: Messaufbau von Pyrometer und Hohlraumstrahler (Schwarzer Strahler) zur Messung des Emissionskoeffizienten

Die Differenz des mit dem Pyrometer gemessenen Reflexsignals der Probe  $S_{RP}$  und des Signals der nicht bestrahlten Probe  $S_{UP}$  entspricht der Differenz des Strahlungssignals des Hohlraumstrahlers bei 100 °C  $S_{S100°C}$  und des Strahlungssignals bei Raumtemperatur  $S_{SRT}$ , multipliziert mit dem Emissionskoeffizienten  $\epsilon$ , so dass der Emissionskoeffizient aus dem Verhältnis der beiden Differenzen berechnet werden kann (Gleichung (1)).

$$\epsilon = \frac{S_{RP} - S_{UP}}{S_{S100°C} - S_{SRT}} \quad (1)$$

Alle Messungen wurden bei einem Azimutwinkel von 45 ° und einem Polarwinkel von 0 ° durchgeführt.

#### Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Zur Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit (Konvektion, Wärmeleitung und –strahlung) gemäß ISO 8302 wurde ein Plattengerät nach DIN EN 1946-2 vom Typ Taurus TLP 900 SZ mit geschützter Heizplatte verwendet (Abbildung 8). Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit wurde an jeweils vier beschichteten und vier nicht beschichteten Hochlochziegeln gemessen, die zuvor für 24 h bei 105 °C im Trockenschrank ausgeheizt wurden. Vor dem Einbau in das Messgerät wurden diese im abgeschalteten Trockenschrank auf Raumtemperatur abgekühlt. Um eine Mörtelschicht zu simulieren wurde eine Dämm-Matte zwischen die Ziegel gelegt. Als mittlere Probentemperatur wurden 10 °C gewählt und eine Temperaturdifferenz von 10 K verwendet. Als Messverfahren wurde die Ein-Punkt-Messung durchgeführt.



Abbildung 8: Aufbau des Einplatten-Wärmeprüfstandes zur Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Ziegeln

## Elementbestimmung

Die beschichteten Hochlochziegel wurden einem Aufschluss- und einem Eluationsverfahren unterzogen. Beim Aufschlussverfahren wurden die Proben durch geeignete Säuren ( $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{HCl}$ ) in den flüssigen Zustand überführt, während beim Eluationsverfahren bidestilliertes Wasser in einem Überkopfdreher eingesetzt wurde. Sowohl die Aufschlüsse als auch die Eluate wurden mittels ICP-Analyse auf ihre jeweiligen Aluminium-Gehalte untersucht.

## Untersuchung des Brandverhaltens

Zur Charakterisierung des Brandverhaltens wurden Versuche mit einem Kleinbrenner nach DIN 4102-1 und nach EN ISO 11925-2 durchgeführt. Dazu wurden beschichtete Proben mit den Maßen  $190 \times 90 \times 20 \pm 5 \text{ mm}$  (DIN 4102-1) und den Maßen  $250 \times 90 \times 20 \pm 5 \text{ mm}$  (EN ISO 11925-2) in einem Aufhängerahmen befestigt (Abbildung 9).

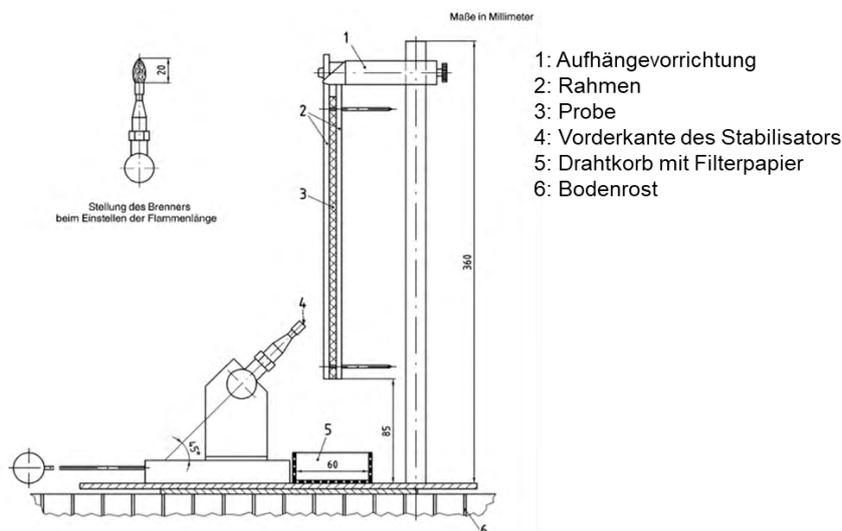


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des Kleinbrenner-Versuchs nach DIN 4102-1 und EN ISO 11925-2

An den Proben wurde gemäß Norm eine Kantenbeflammung über eine Dauer von 15 s und 30 s durchgeführt. Bei dem Versuch wurde das Verhalten der beschichteten Proben auf ein mögliches Entzünden, brennendes Abtropfen in den Drahtkorb, Entzünden des Filterpapiers und die Entstehung von Rauch untersucht.

## Ergebnisse

### Emissionskoeffizient und äquivalente Wärmeleitfähigkeit

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass in jedem Fall einer Ziegelbeschichtung eine Absenkung des Emissionskoeffizienten erreicht werden konnte. Die Emissionskoeffizienten der unbeschichteten Ziegel liegen im Bereich von 0,943 bis 0,976, die entsprechenden Werte der beschichteten Ziegel im Bereich von 0,185 bis 0,361. Die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der unbeschichteten Ziegel liegen zwischen 0,090 bis 0,157  $\text{W}/(\text{mK})$ . Durch die Beschichtung konnten die Werte auf 0,075 bis 0,126  $\text{W}/(\text{mK})$  verringert werden, entsprechend einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um 8,22 bis 28,62 % (Tabelle 1).

Tabelle 1: Emissionskoeffizienten und äquivalente Wärmeleitfähigkeiten vor und nach der Beschichtung sowie die resultierende prozentuale Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch die Wärmedämmbeschichtung für 16 verschiedene Mauerziegel

Ziegel Sorte	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	$\epsilon_0$ [-]	$\epsilon_b$ [-]	$\lambda_{\text{äq},0}$ [W/mK]	$\lambda_{\text{äq},b}$ [W/mK]	Verb. [%]
1	0,60	0,955	0,360	0,121	0,111	<b>8,22</b>
2	0,64	0,950	0,303	0,100	0,089	10,32
3	0,65	0,976	0,323	0,121	0,105	12,77
4	0,65	0,962	0,350	0,090	0,078	13,23
5	0,79	0,960	0,310	0,145	0,126	13,39
6	0,86	0,950	0,280	0,139	0,118	14,47
7	0,65	0,964	0,277	0,094	0,081	14,69
8	0,79	0,960	0,361	0,125	0,106	15,43
9	0,61	0,963	0,185	0,098	0,083	15,68
10	0,54	0,943	0,267	0,153	0,124	18,81
11	0,62	0,962	0,313	0,120	0,095	20,62
12	0,57	0,956	0,253	0,096	0,075	21,63
13	0,63	0,950	0,304	0,123	0,094	23,35
14	0,65	0,976	0,323	0,157	0,118	24,88
15	0,71	0,945	0,311	0,128	0,094	26,32
16	0,62	0,943	0,267	0,108	0,077	<b>28,62</b>

$\epsilon_0$  = Emissionskoeffizient unbeschichtet  
 $\epsilon_b$  = Emissionskoeffizient beschichtet  
 $\lambda_{\text{äq},0}$  = Äquivalente Wärmeleitfähigkeit unbeschichtet  
 $\lambda_{\text{äq},b}$  = Äquivalente Wärmeleitfähigkeit beschichtet  
 Verb. = Prozentuale Absenkung bzw. Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Des Weiteren zeigte sich eine Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten vom Azimut-Winkel (Abbildung 10). Der niedrigste Emissionskoeffizient mit  $\epsilon = 0,122$  wurde bei einem Azimut-Winkel von 45 ° gemessen.

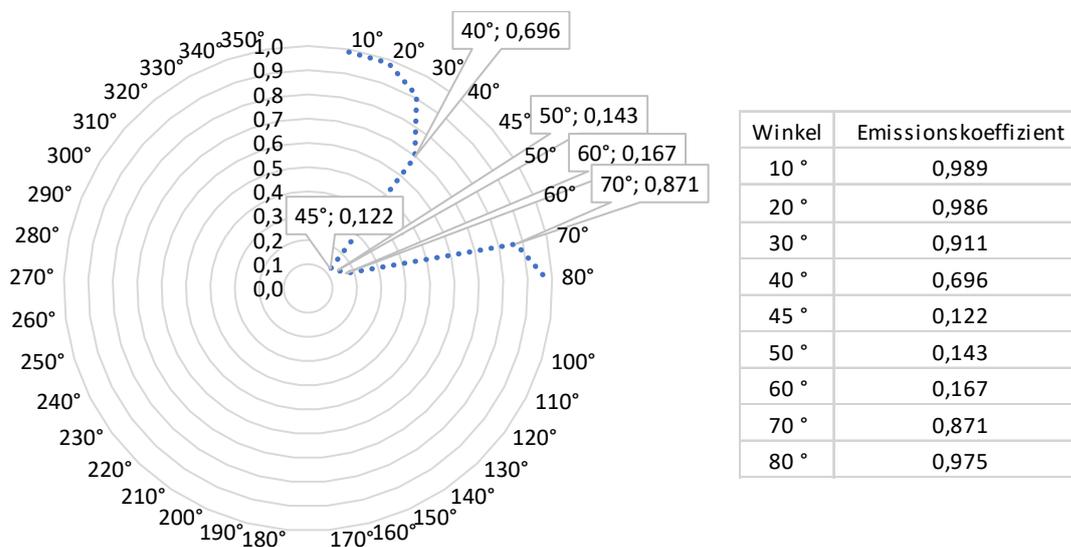


Abbildung 10: Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten vom Azimut-Winkel an einem exemplarischen Beispiel

#### Aluminium-Gehalt in unbeschichteten/beschichteten Ziegeln und wasserlöslicher Anteil

Obwohl es sich bei der Beschichtung um ein Aluminium-Pigment handelt, zeigt sich bei den Messungen der Aufschlüsse kein deutlicher Unterschied zwischen den unbeschichteten und den beschichteten Ziegelproben. Als Erklärung kann angenommen werden, dass Aluminium in oxidischer Form als eines der Hauptbestandteile in der Ziegelmatrix enthalten ist und der durch die Beschichtung zusätzlich aufgebrachte Aluminium-Anteil den Gesamt-Aluminium-Gehalt der beschichteten Proben praktisch nicht erhöht.

Bei den wasserlöslichen Aluminium-Gehalten verhält es sich anders. Bei den beschichteten Ziegelproben löst sich ein um den Faktor 9-10 erhöhter Aluminium-Anteil im Eluat, als bei den unbeschichteten Ziegeln. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass aus der Aluminium-Pigment-Beschichtung wasserlösliche  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen herausgelöst werden.

Tabelle 2: Aluminium-Gehalte in Säure-Aufschlüssen unbeschichteter und beschichteter Ziegelproben sowie zugehörige wasserlösliche Aluminium-Gehalte (Spurenanalysen mittels ICP)

Aufschluss unbeschichtete Ziegel							Eluation unbeschichtete Ziegel						
Probe	Einwaage [mg]	Element	Gehalt [mg]	c [mg/l]	w [ppm]	w [Ma.-%]	Probe	Einwaage [mg]	Element	Gehalt [mg]	c [mg/l]	w [ppm]	w [Ma.-%]
1	405,0	Al	31,22	312,24	77096	7,7	1	40060	Al	1,09	0,03	27	0,00273
2	408,4	Al	31,96	319,63	78265	7,8	2	40060	Al	1,04	0,03	26	0,00259
3	410,5	Al	33,55	335,55	81741	8,2	3	40060	Al	1,09	0,03	27	0,00272

Aufschluss beschichtete Ziegel							Eluation beschichtete Ziegel						
Probe	Einwaage [mg]	Element	Gehalt [mg]	c [mg/l]	w [ppm]	w [Ma.-%]	Probe	Einwaage [mg]	Element	Gehalt [mg]	c [mg/l]	w [ppm]	w [Ma.-%]
1	400,6	Al	30,25	302,54	75521	7,6	1	41180	Al	10,55	0,26	256	0,02562
2	402,3	Al	30,50	304,97	75807	7,6	2	41180	Al	8,90	0,22	216	0,02162
3	409,7	Al	33,83	338,26	82563	8,3	3	41180	Al	9,39	0,23	228	0,02279

### Kleinbrenner-Versuche zur Prüfung des Brandverhaltens

Alle beschichteten Ziegelproben zeigen bei den Brandversuchen weder ein Entzünden noch ein brennendes Abtropfen der Beschichtung. Daher wurde auch das Filterpapier im Kleinbrenner-Versuchsstand nicht entzündet (Abbildung 11) und es entstand auch keine Rauchentwicklung.



Abbildung 11: Kleinbrenner-Versuch an beschichteter Ziegelprobe. Die Beschichtung konnte nicht entzündet werden, zeigte kein Abtropfen und auch keine Rauchentwicklung.

Die beschichteten Ziegelproben erfüllen daher die Kriterien der Brandschutz-Klassen B2, B1, F und E mit einer Beflammungszeit von 15 s, als auch die Kriterien der Brandschutz-Klassen D, C und B mit einer Beflammungszeit von 30 s. Die beschichteten Ziegel können in die nationalen Brandschutz-Klassen B2 und B1 eingestuft werden sowie in die internationalen Brandschutz-Klassen E, D, C und B.

### Zusammenfassung

Durch die Beschichtung der inneren Ziegeloberflächen mit einem Aluminium-Pigment konnten die Wärmedämmeigenschaften je nach Ziegelgeometrie zwischen 8,22 % bis 28,62 % verbessert werden. Die Applikation der Infrarot-Reflexbeschichtung kann apparativ einfach erfolgen. Da die Pigment-Suspension frei von organischen Lösemitteln ist, werden auch die Aspekte Arbeitssicherheit und Umweltschutz in deutlicher Weise berücksichtigt. Alle beschichteten Ziegelproben zeigen in der Eluat-Analyse eine 9- bis 10-fach erhöhte Wasserlöslichkeit für  $Al^{3+}$  - Ionen als unbeschichtete Ziegelproben. In der Deponieverordnung (DepV) ist Aluminium jedoch aktuell nicht als Grenzwert hinterlegt, so dass eine Ablagerung so ausgerüsteter Abrissziegel auf Bauschutt-Deponien zum jetzigen Zeitpunkt kein Problem darstellt. Langfristig sollte dies jedoch bei der Entwicklung zukünftiger Verwertungskonzepte berücksichtigt werden. Die Ziegelbeschichtung zeigte in den Kleinbrenner-Versuchen keine negativen Auswirkungen auf das Brandverhalten, so dass in diesem Bereich einer Zulassung als Bauprodukt nichts im Wege steht.

### 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, M.Eng. K. Oeder und Prof. Dr. W. Krcmar

#### Einleitung

Private und öffentliche Gebäude verbrauchen trotz aller Verbesserungsbestrebungen über 40 % der gesamten in Europa bereitgestellten Energie. Bei einem durchschnittlichen Einfamilienhaus erfordert die Beheizung mehr als zwei Drittel des gesamten Energiebedarfs. Dabei werden etwa 36 % der Treibhausgase durch Gebäude emittiert. Ein gangbarer Weg um Teilziele der Energiewende zu erreichen, besteht darin, den Energieverbrauch für die Gebäudebeheizung durch verbesserte Wärmedämmung abzusenken. Um die immer anspruchsvoller werdenden klimapolitischen Ziele zu erreichen, hat u.a. die Mauerziegel-Industrie innovative Ziegelformate entwickelt und durch Wärmeweg-verlängernde Lochbild-Geometrien, die Absenkung der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten durch Porosierung, die Einführung der Planschleiftechnik verbunden mit der Entwicklung deckelnder Dünnbettmörtel sowie durch das Einbringen von Verfüllstoffen in die Lochbildhohlräume höchstwärmedämmende Mauerziegel produziert. Bei den monolithischen Hochlochziegeln bewirken diese Maßnahmen eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit. Jedoch führen einige dieser Produktinnovationen gleichzeitig zu einer Minderung der Druckfestigkeit und zu einer Verschlechterung der Schallschutzeigenschaften. Die Produktoptimierung von Mauerziegeln ist aufgrund des hohen experimentellen und apparativen Aufwandes jedoch sehr zeit- und kostenintensiv. Um künftig die Entwicklungszeiten bei Produktinnovationen zu beschleunigen und Entwicklungskosten einzusparen, wird im hier vorgestellten Forschungsprojekt die Methode der Finiten Elemente (FEM) zur Entwicklung höchstwärmedämmender Lochbild-Geometrien für Mauerziegel mit gleichzeitig optimierten Schallschutzeigenschaften eingesetzt. Durch anschließendes Rapid Prototyping von PLA-Ersatzziegeln zur Verifizierung der Simulationsergebnisse sowie durch Rapid Prototyping der metallischen Kernsätze in den Mundstücken gelingt eine vergleichsweise schnellere Herstellung von Versuchsziegeln mit optimierten Eigenschaften. Dabei kann der Entwicklungsprozess neuartiger Ziegel von derzeit ca. 3-5 Jahren auf ca. 6 Monate verkürzt und Entwicklungskosten eingespart werden.

#### FEM - Simulationen

Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, künftige Entwicklungszeiten für neue, höchstwärmedämmende Mauerziegel extrem zu verkürzen. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass gleichzeitig mit der verbesserten Wärmedämmung auch ein verbessertes Schallabsorptionsvermögen bei ausreichender Druckfestigkeit resultieren soll. Das Ziel wird durch iterative Finite Elemente Simulation der Ziegelgeometrie in Bezug auf Wärmedämmung und Schallabsorption erreicht. Dazu wird vor allem die Lochbild-Geometrie der Ziegel als maßgebender Entwicklungsparameter variiert. In einem ersten Simulationsschritt wird eine neuartige Ziegelgeometrie entwickelt, die sich z.B. durch ein maximales Wärmedämmvermögen auszeichnet. Anschließend durchläuft das so erstellte Lochbild einen weiteren Simulationsschritt, bei dem die schalldämmenden Eigenschaften im Vordergrund stehen. Diese genannten Simulationsschritte stellen dabei eine Iterationsschleife dar, bei der jedes Lochbild schrittweise so lange modifiziert wird, bis jeweils die besten realisierbaren Ergebnisse für Wärmedämmung und Schallisolation erzielt werden. Durch die genannte Methodik soll die EDV-basierende und damit vergleichsweise schnelle Entwicklung einer neuen Generation von Mauerziegeln mit optimalen Produkteigenschaften vorangetrieben werden. Dabei entsteht bei der virtuellen Konstruktion der Ziegel-Geometrie automatisch die für die Formgebung benötigte Geometrie des Mundstücks als Negativ, wobei die Trocken- und Brennschwindungen der Tonmassen zu berücksichtigen sind. Die so erhaltenen Konstruktionsdaten sollen im Rahmen des Vorhabens in eine Laser-Cusing Rapid Prototyping-Anlage eingelesen und die benötigten Kernsätze aus Metall hergestellt werden. Diese können nun unmittelbar im Ziegelwerk in die bereits vorhandenen Mundstücke eingebaut werden und Versuchsproduktionen der neuentwickelten Ziegelgenerationen erfolgen.

#### 3D-Druck von Ziegel-Prototypen

Um die wärmedämmenden Eigenschaften neuer Mauerziegel-Generationen bereits vor der eigentlichen Herstellung keramischer Prototypen überprüfen zu können, werden die erzielbaren äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten in einem

ersten Schritt zunächst an PLA-Ersatzziegeln aus Polymilchsäure verifiziert, die mittels 3D-Rapid Prototyping hergestellt werden (Abbildung 12).

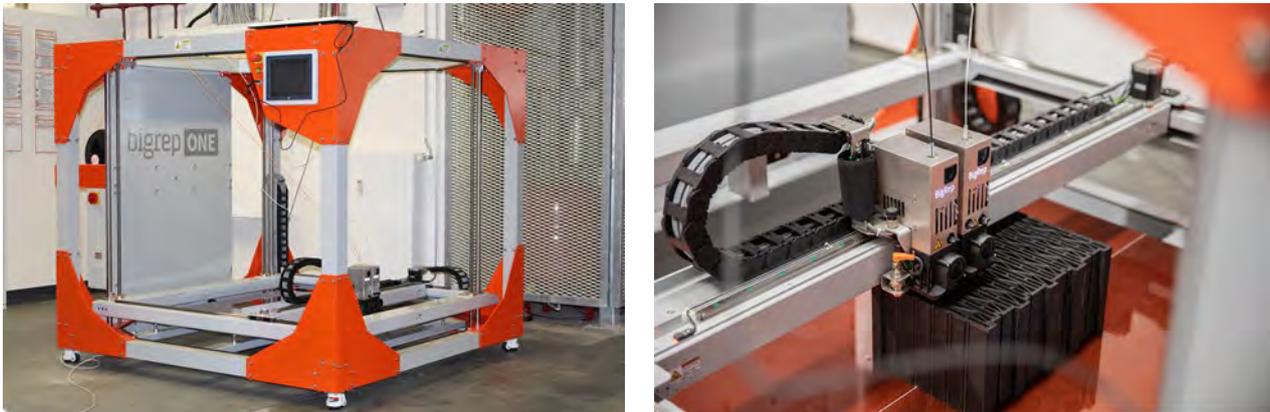


Abbildung 12: 3D-Drucker „BigRep ONE v3“ mit einem Druckvolumen von über einem Kubikmeter und dem FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication) zur Erstellung von Kunststoff-Ziegelmodellen aus PLA (Polymilchsäure).

Die Erstellung von Kunststoff-Ziegelerersatz-Modellen mit Hilfe eines polymeren 3D-Druck-Verfahrens ermöglicht bereits in der Vorentwicklung einen quantitativen Vergleich zwischen den Wärmedämmvermögen verschiedener Lochbildvarianten sowie eine erste Verifizierung der durch die FEM-Wärmesimulationen ermittelten Ergebnisse. An den so hergestellten Kunststoff-Modellziegeln können erste Messungen im Wärmeprüfstand zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten durchgeführt und die Ergebnisse auf entsprechende keramische Ziegelgeometrien übertragen werden.

## Ergebnisse

### FEM-Simulation: Lochbildoptimierung eines Ziegels mit „HV-Lochung“

Im Rahmen des Projektes wurde u.a. eine bestehende Ziegelgeometrie mit sogenannter „HV-Lochung“ schallschutztechnisch verbessert, indem die bereits vorhandenen Stege mit sogenannten „Schallstoppnern“ ausgerüstet wurden. Die Lochbilder mit „Schallstoppnern“ können aus Patentschutzgründen leider derzeit noch nicht veröffentlicht werden. Aus den durchgeführten Simulationen und den tatsächlich produzierten keramischen Versuchsziegeln ging hervor, dass das bewertete Schalldämm-Maß ( $R_w + C_{tr}$ ) um 1,4 dB verbessert werden konnte. Aus den zugehörigen wärmetechnischen FEM-Simulationen ging hervor, dass sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch die Applikation der „Schallstopper“ nicht verschlechtert hat. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass die Druckfestigkeit durch die „Schallstopper“ nicht verschlechtert, sondern im Gegenteil sogar verbessert wird, weil durch die „Schallstopper“ eine Massezunahme des Ziegels um 10 % erfolgt.

Des Weiteren wurde der Einfluss einer von der THN entwickelten IR-Reflexbeschichtung in den inneren Ziegel-Hohlräumen untersucht. Die IR-Reflexbeschichtung führt zu einer Absenkung des Emissionskoeffizienten von  $\epsilon = 0,95$  auf  $\epsilon = 0,30$ . Dadurch wird der Anteil der Wärmestrahlung an der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels um bis zu 68 % abgesenkt, so dass je nach Ziegelgeometrie die äquivalente Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 10 bis 32 % abgesenkt werden kann. Mittels dem FEM-Programm ANSYS Fluent erfolgte eine Vorhersage der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der HV-Lochung „ohne Schallstopper“ in der Mauerstärke 365 mm von  $\lambda_{\dot{a}q} = 0,0934$  [W/m·K]. Werden die Ziegel mit der IR-Reflexbeschichtung ausgerüstet, erniedrigt sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf  $\lambda_{\dot{a}q} = 0,0636$  [W/(m·K)]. Dies entspricht einer Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und damit einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um 31,91 %. Im Falle der FEM-Simulationen des gleichen Hochlochziegels mit integrierter „Schallstopper-Technologie“ wurde beim unbeschichteten Ziegel „mit Schallstoppnern“ eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{\dot{a}q} = 0,0945$  [W/m·K] vorhergesagt. Wird der so gestaltete Ziegel mit der IR-Reflexbeschichtung ausgerüstet, so erniedrigt sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf  $\lambda_{\dot{a}q} = 0,0675$  [W/(m·K)], entsprechend um 28,57 %.

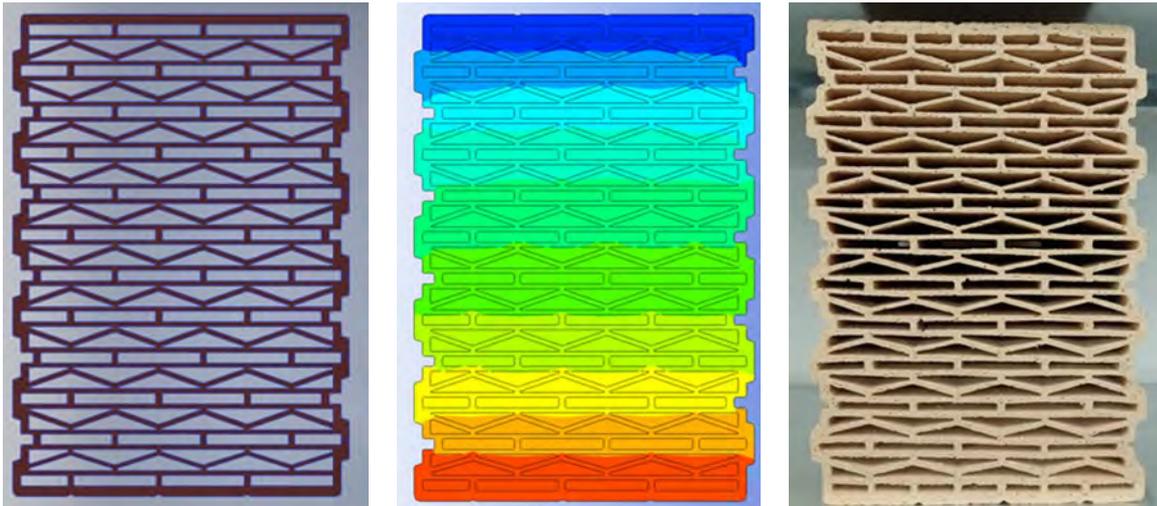


Abbildung 13: Geometrie der „HV-Lochung“ eines hochwärmedämmenden Mauerziegels in der Wandstärke 365 mm. CAD-Zeichnung des Lochbildes (l); mittels FEM-Simulation ermittelte Temperaturverteilung des Hochlochziegels mit „HV-Lochung“ (m) und konventionell erhältlicher Mauerziegel mit einer Rohdichteklasse von  $0,65 \text{ kg/dm}^3$  (r).

### FEM-Simulation: Entwicklung eines „Strahlungs- bzw. Rautenziegels“

Aus einer weiteren FEM-Parameterstudie ging hervor, dass sich ein Hochlochziegel mit oberen und unteren Rautenwinkeln von  $160^\circ$  durch eine vergleichsweise niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeit auszeichnen sollte (Abbildung 14). Mit dieser Lochbild-Geometrie wird eine sehr hohe Wärmedämmung bei einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{\text{äq}} = 0,0792 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$  im unbeschichteten Zustand erzielt. Dabei wird gleichzeitig die Masse des Ziegels im Vergleich zur HV-Lochung um 11 % gesteigert, so dass angenommen werden kann, dass neben den sehr guten Wärmedämmeigenschaften zusätzlich eine hohe Druckfestigkeit und gleichzeitig eine gute Schallabsorption erwartet werden können. Vergleicht man die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten dieser Lochbild-Geometrie mit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der HV-Lochung ( $\lambda_{\text{äq}} = 0,0934 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ ), so kann durch diesen Lochbild-Entwurf die Wärmedämmung um 15 % verbessert werden. Verantwortlich für diese guten Wärmedämm-Eigenschaften sind die langen Wärmetransportwege im Ziegelinneren und entlang der Außenkontur, die hohe Anzahl der Stegriegen, wodurch die Konvektion minimiert wird (ab 10 Lochreihen nahezu ruhende Luft) sowie die durch die  $160^\circ$ -Winkel in den Rauten resultierenden schmalen Löcher (Konvektion minimiert) und die durch die Winkelform verringerte Anzahl an Wärmestrahlen in direkter Richtung der Warm- zur Kaltseite des Ziegels. Würde dieses, bisher nur virtuell und als 3D-PLA-Ersatzziegel entwickelte Lochmuster zusätzlich mit der entwickelten IR-Reflex-Beschichtung ausgerüstet, so gelingt die Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bis auf  $\lambda_{\text{äq}} = 0,0636 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ . Dies entspricht einer Verbesserung der Wärmedämmung gegenüber dem Ausgangswert von  $\lambda_{\text{äq}} = 0,0792 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$  um 20 %. Um die Schallabsorption auch an diesem virtuell entwickelten Hochlochziegel zu verbessern, wurde die neu entwickelte „Schallstopper-Technologie“ auch auf diesen Versuchsziegel übertragen. Dabei zeigte sich im Simulationsergebnis, dass die guten Wärmedämmeigenschaften trotz Anbringung der „Schallstopper“ erhalten bleiben; die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bleibt nahezu konstant. Die Masse des „Rautenziegels“ ist im Vergleich zur „HV-Lochung“ um 12 % erhöht, während die äquivalente Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur „HV-Lochung“ um 14 % geringer ist. Es kann außerdem angenommen werden, dass die Massezunahme durch die „Schallstopper“ auch beim „Rautenziegel“ eine Erhöhung der Druckfestigkeit bewirkt.

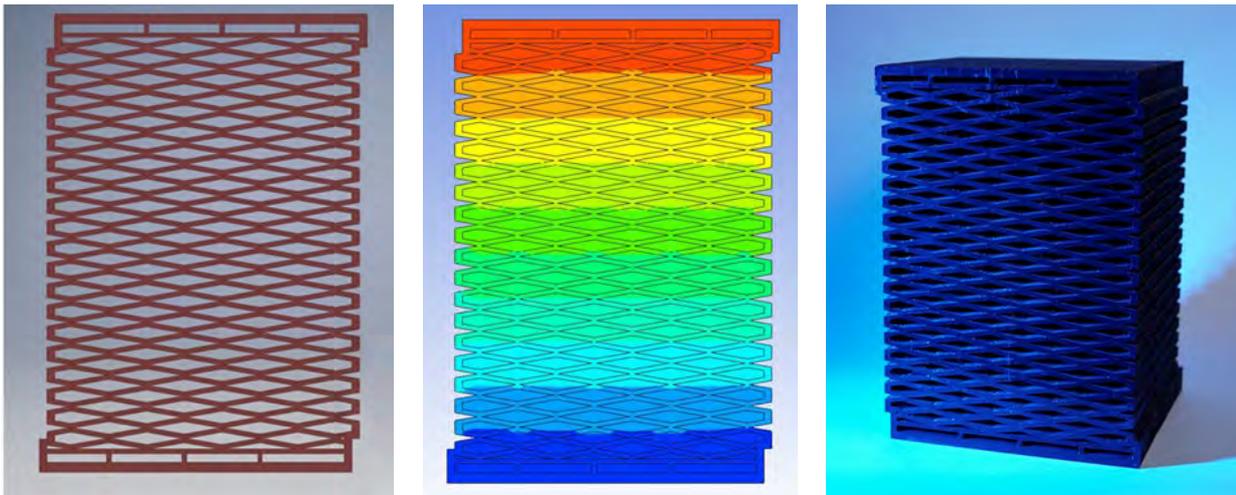


Abbildung 14: Neu entwickelte Geometrie eines „Rautenziegels“ für die zusätzliche Applikation einer IR-Reflexbeschichtung (l). Mittels FEM-Simulation ermittelte Temperaturverteilung in einem Hochlochziegel mit 160°-Rautenmuster (m). Das Lochmuster zeichnet sich durch einen vergleichsweise erhöhten Strahlungsanteil aus, der durch eine IR-Reflexbeschichtung um 79 % gemindert werden kann. 3D-Ersatzziegel aus Polymilchsäure, THN-Entwicklung (r).

### FEM-Simulation: Entwicklung eines „Zonenziegels“

Weitere Untersuchungen beschäftigten sich mit der Entwicklung eines „Zonenziegels“ (Abbildung 15). Dabei war von besonderem Interesse, dass der Zonenziegel Bereiche mit besonders guten Schalldämmeigenschaften und gleichzeitig einen oder mehrere Bereiche mit besonders guten Wärmedämmeigenschaften beinhaltet. Aufgrund der großen Hohlräume in den beiden Schallschutz-Zonen ist der Anteil der Wärmeübertragung durch Konvektion sehr hoch, wodurch gemäß FEM-Simulation, relativ schlechte Wärmedämmeigenschaften mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von nur  $\lambda_{\text{äq}} = 0,1113 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$  resultieren. Durch Applikation einer IR-Reflexbeschichtung in der Wärmedämm-Zone wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit um 31,45 % auf  $\lambda_{\text{äq}} = 0,0763 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$  herabgesetzt. Werden zusätzlich die beiden außen liegenden Schallschutz-Zonen mit CALOSTAT ( $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,019 \text{ W/mK}$ ) verfüllt, so resultiert in der Simulation eine weitere Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf  $\lambda_{\text{äq}} = 0,0588 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ . (Im Vergleich mit der „HV-Lochung“ entspricht dies einer Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{äq}}$  und damit Verbesserung der Wärmedämmung um 37 %). Werden dem IR-beschichteten und mit CALOSTAT verfüllten „Zonenziegel“ in der Wärmedämm-Zone „Schallstopper“ virtuell hinzugefügt, so bleiben die sehr guten Wärmedämmeigenschaften des „Zonenziegels“ erhalten. Da sich infolge der applizierten „Schallstopper“ die Ziegelmasse erhöht, kann davon ausgegangen werden, dass die Druckfestigkeit gleichbleibt oder sogar geringfügig erhöht wird.

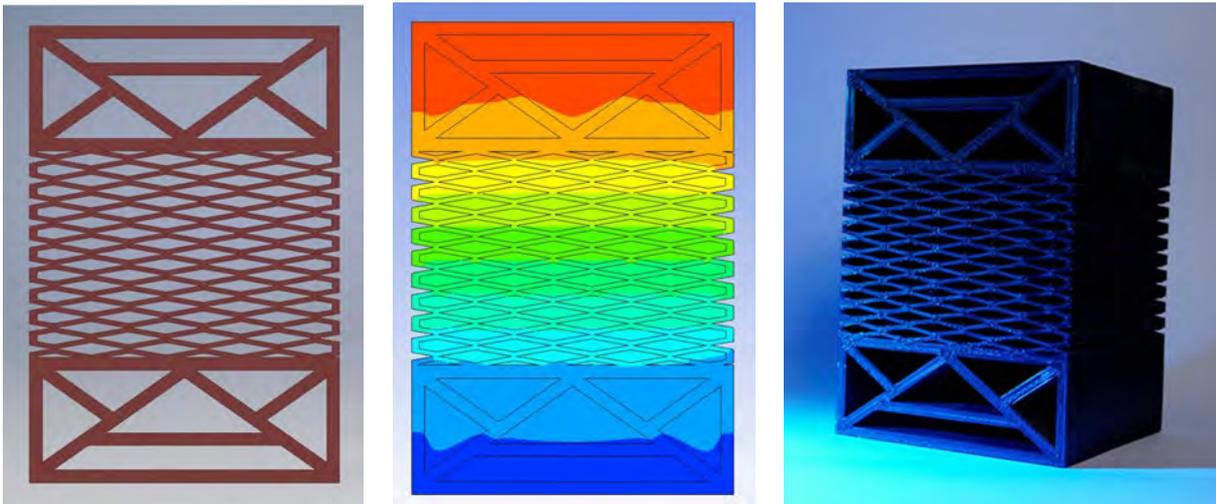


Abbildung 15: Neu entwickelte Geometrie eines „Zonenziegels“. Das innere Lochmuster zeichnet sich durch eine erhöhte Wärmedämmung aus; die beiden außenliegenden Zonen bewirken eine erhöhte Schallabsorption. Die innere Zone kann zusätzlich durch eine IR-Reflexbeschichtung weiter wärmetechnisch optimiert werden. Die beiden außenliegenden Zonen können zusätzlich mit Dämmstoff verfüllt werden (l). Mittels FEM-Simulation ermittelte Temperaturverteilung des Zonenziegels (m). 3D-Ersatzziegel aus Polymilchsäure, THN-Entwicklung (r).

### 3D-Laser-Cusing

Die Herstellung der Mundstückkerne erfolgt durch ein 3D-Laser Cusing-Verfahren aus feinstem Stahl-Pulver. Dazu wird mittels eines Zeichenprogramms ein vollwertiges neues Mundstück mit optimierten Kerneinsätzen, Haltestiften, Kernbügelhalter und Bremsen konstruiert. Abbildung 16 zeigt auf der linken Seite die Konstruktionszeichnung der Kerneinsätze eines neu entwickelten Zonenziegels; im rechten Teil ist die Laser Cusing-Anlage gezeigt.

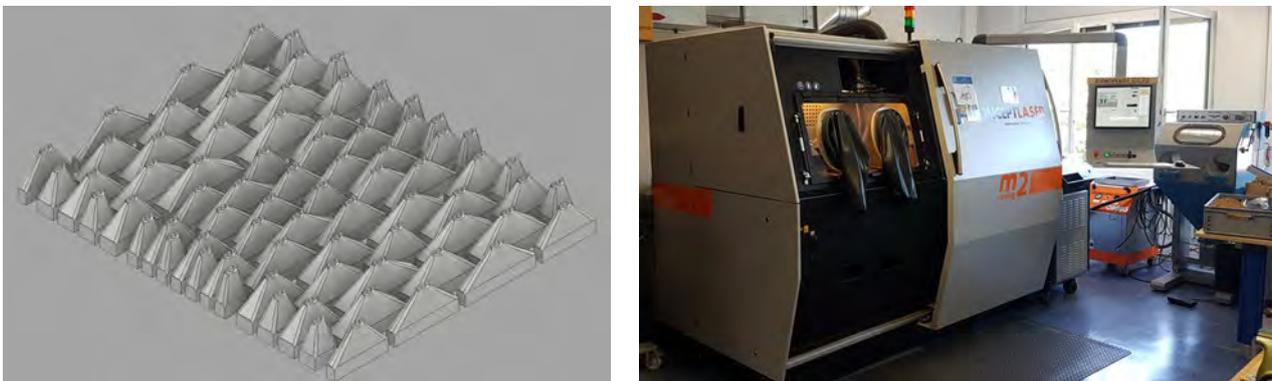


Abbildung 16: CAD-Zeichnung der Kerneinsätze eines neuartigen Zonenziegels (l) und Laser Cusing - Edelstahldrucker im 3D-Zentrum der TH Nürnberg.

### Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch FEM-Simulationen in Verbindung mit dem 3D-Druck von PLA-Ersatzziegeln und dem Laser Cusing der Mundstückkerne sehr zügig neuartige Ziegelgeometrien entwickelt und die zugehörigen Formgebungswerkzeuge hergestellt werden können. Dadurch wird die vergleichsweise schnellere Entwicklung und Erprobung neuartiger Ziegelgeometrien mit verbesserten Werkstoffeigenschaften ermöglicht, wie im vorliegenden Fall mit verbesserten wärmetechnischen und schallschutztechnischen Eigenschaften der Hochlochziegel. Die hier entwickelte „Schallstopper-Technologie“ kann auf jede Ziegelgeometrie übertragen und genutzt werden.

**1.1.4 EU-Projekt Horizon 2020 „LightCoce: 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, K. Oeder, Dr. M.Eng. S. Schmidt und Prof. Dr. W. Krcmar**



Das EU-Projekt „LightCoce“ (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. Unter den Teilnehmern befinden sich Hochschulen, Universitäten, Forschungsinstitute, Ingenieurbüros sowie Industriebetriebe. Ziel ist die Errichtung und Vermarktung einer europaweit vernetzten Forschungsinfrastruktur zur energieeffizienten Weiterentwicklung von Dämm- und Leichtbau-Werkstoffen. Eine inzwischen gegründete zentrale Anlaufstelle mit Sitz in Griechenland vermittelt zukünftig den Kontakt zwischen Interessenten aus der Industrie und geeigneten Forschungspartnern aus dem LightCoce-Konsortium. Drei wissenschaftliche Mitarbeiter sowie sieben studentische Hilfskräfte aus der Arbeitsgruppe von Professor Dr. Krcmar haben sich auf die Entwicklung von Ziegelkeramiken mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften spezialisiert. Dafür wurde im ersten Projektzeitraum eine Pilotanlage zur Fertigung von Laborziegeln aufgebaut, wobei alle verfahrenstechnischen Schritte der Ziegelherstellung von der Rohstoffmischung, Aufbereitung, Formgebung, Trocknung und dem Brennprozess abgebildet wurden. Darüber hinaus können die wesentlichen werkstofftechnischen Ziegeleigenschaften geprüft werden sowie analytische Untersuchungen an den Produkten erfolgen. Auch die Prozessführung im Technikum wird überwacht. Dafür wurden ein Ziegelextruder, ein Trockenschrank und ein Brennofen mit speziellen Sensoren zur online-Messung verfahrenstechnischer Parameter ausgestattet. Bei dem Messequipment handelt es sich um eine Spezialanfertigung eines im Forschungskonsortium integrierten Ingenieurbüros. Durch Sensoren erfasst werden:

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

Außerdem wurde ein tragbares Mess-System zur Bestimmung der Parameter Temperatur, CO-, CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalt im Ofenabgas angeschafft. Mithilfe der installierten Sensor-Ausrüstung besteht die Möglichkeit, im Verlauf von Versuchsproduktionen die oben genannten verfahrenstechnischen Kenngrößen in Echtzeit zu überwachen und in Versuchsprotokollen zu dokumentieren. Dadurch können neue Forschungsergebnisse schneller in die Großproduktion eines Ziegelwerks übertragen werden.

Im Rahmen einer ersten Aufgabenstellung, die auch die Funktionstüchtigkeit der Pilot-Anlage belegt, soll die thermische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$  einer typischen Ziegelkeramik durch Zugabe geeigneter Additive um 33 % abgesenkt werden. Dadurch verbessert sich die Wärmedämmeigenschaft des betrachteten Mauerziegels um 28,6 %. In Tabelle 3 werden werkstofftechnische Zielgrößen des Forschungsvorhabens mit Kennwerten gemäß dem derzeitigen Stand der Technik verglichen. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die Druckfestigkeit nicht wesentlich verringert werden soll.

Tabelle 3: Stand der Technik und Zielgrößen bei der Entwicklung hochwärmedämmender Leichthochlochziegel

Parameter	Stand der Technik	Zielgrößen
Scherbenrohddichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,5	$\leq 1,0$
Druckfestigkeit $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\geq 6$	$\geq 6$
Thermische Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ [W/(mK)]	0,375	0,25
Äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [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 17).



Abbildung 17: 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 (rechts).

Für eine optimale Steigerung der Wärmedämmeigenschaften ist das vollständige Verbrennen des Porosierungsmittels während des Ziegelbrandes von entscheidender Bedeutung. Dazu muss während des Verbrennungsvorgangs eine ausreichende Diffusion von Sauerstoff bis zur Reaktionsfront gewährleistet sein, die sich, ausgehend vom Rand, im Verlauf der Reaktion mehr und mehr in das Innere des Scherbens verlagert. Der alleinige Zusatz von nanoskaligem „Carbon Black“ zum Tonrohstoff führt zu einem nicht ausreichend diffusionsoffenen Gefüge, um ein vollständiges Ausbrennen innerhalb technisch üblicher Zeiträume zu gewährleisten (Abbildung 19). Eine zeitliche Verlängerung des energieintensiven Sinterungsprozess im Tunnelofen verbietet sich jedoch aus ökologischer und ökonomischer Sicht. Der zusätzliche Einsatz eines branchenüblichen Porosierungsmittels erwies sich schließlich als erfolgreicher Ausweg: Neben den eher kugelförmigen nanoskaligen „Carbon-Black“- bzw. Rußpartikeln wurde der Tonmischung „Papierfangstoff“, ein Reststoff aus der Kreislaufwirtschaft der Papierindustrie, zugesetzt, der in Form von nur wenige Millimeter großen Fasern vorliegt. Nach dem Ausbrennen hinterlässt der Papierfangstoff ein überwiegend kanalförmiges Poren-Netzwerk in der Ziegelmatrix, das dann den Sauerstoff-Zutritt zu den erst bei höheren Temperaturen verbrennenden Kohlenstoff-Nanopartikeln gewährleistet. Abbildung 18 zeigt den Verlauf der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten sowie der Druckfestigkeiten von Ziegelkeramik bei Dosierung von 1 Ma.-%, 5 Ma.-% und 10 Ma.-% „Carbon Black“ als Porosierungsmittel.

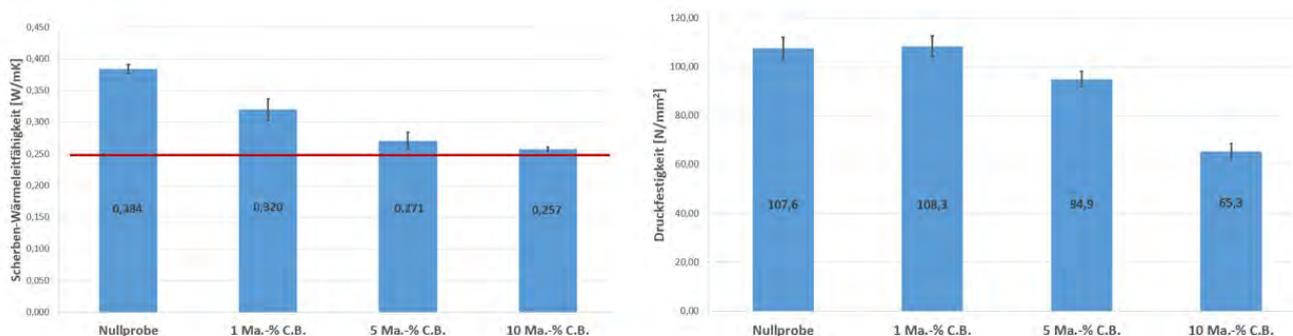


Abbildung 18: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  (l) und Druckfestigkeiten (r) von Laborziegeln in Abhängigkeit von der Zugabe an „Carbon Black“ (C.B.) als Porosierungsmittel im Vergleich mit der unporierten Ziegel-Nullprobe.

Außerdem tragen auch die durch den Ausbrand vom Papierfangstoff entstehenden Makroporen zur Verbesserung der Isolationseigenschaften bei. Bei der neuen, aktuell noch laufenden Versuchsreihe unterschreiten alle bisher gemessenen Ziegelscherben den Zielwert der thermischen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr}$  des Ziegelscherbens von 0,25 W/(mK), ab einer Zugabe von 10 Ma.-% Carbon Black zu einer Ton-Papierfangstoff-Mischung deutlich.



Abbildung 19: Optischer Vergleich zweier Probekörper aus Ziegelkeramik. Dem Ton wurde bei der Herstellung des links abgebildeten Probekörpers „Carbon Black“ als Porosierungsmittel zugesetzt. Beim dem rechts abgebildeten Probekörper wurde zusätzlich noch Papierfangstoff zugegeben und beide Probekörper wurden mit derselben Brennkurve gesintert. Der „schwarze Kern“ ist auf unverbranntes „Carbon Black“ zurückzuführen. Aufgrund einer unzureichenden Sauerstoff-Diffusion konnte das „Carbon Black“ nicht ausbrennen. Bei der rechts gezeigten Ziegelkeramik konnte das „Carbon Black“ infolge der zusätzlichen Zugabe von Papierfangstoff sehr gut ausbrennen.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden der Tonmasse „Reisspelzen“ als Porosierungsmittel zugesetzt. Sowohl fein aufgemahlen, als auch im Ganzen hinterlassen diese jedoch nach dem Ausbrennen vergleichsweise größere Poren. Durch die „Reisspelzen“ wird eine deutliche Absenkung der thermischen Leitfähigkeit  $\lambda_{10, \text{tr}}$  des Ziegelscherbens erzielt. Dabei führt die Makroporosierung allerdings zu einer drastischen Abnahme der Druckfestigkeitswerte (Abbildung 20).

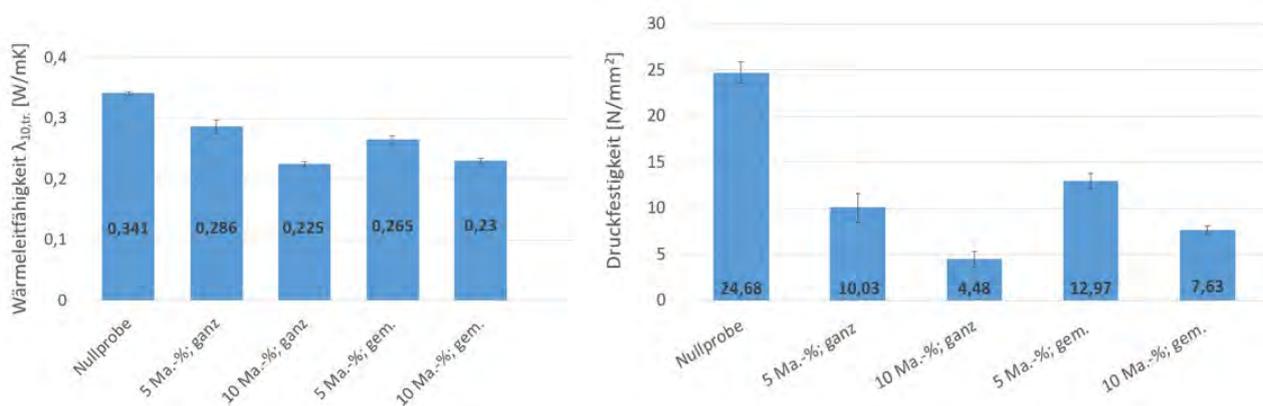


Abbildung 20: Mittelwerte der thermischen Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, \text{tr}}$  (l) und Druckfestigkeiten (r) in Abhängigkeit von der Zugabe an „Reisspelzen“, entweder im Ganzen oder fein aufgemahlen, als Porosierungsmittel im Vergleich mit der unporosierten Ziegel-Nullprobe.

### 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



*Life*  
**Hypobrick**



#### 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<sub>2</sub>-Abspaltung aus mineralischen Einsatzstoffen statt, mit entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gleichzeitig führt die Verbrennung der benötigten Primärbrennstoffe ebenfalls zu einer CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Um die Klimaschutzziele zu erreichen sollten sich Baustoffe der Zukunft bereits bei ihrer Herstellung durch einen geringeren Energieverbrauch mit verminderten CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-Emissionen. Im Vorhaben werden verschiedene Abbruchmaterialien aus dem Baubereich wie Ziegelschleifstaub, Ziegelbruch, 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. In das Forschungsvorhaben sind u.a. ein deutsches und ein spanisches Ziegelwerk integriert. Beide Ziegelwerke übernehmen die hergestellten Rezepturen. Das Ziel besteht in der Substitution gebrannter Ziegel durch kalterhärtende Geopolymer-Steine. Das spanische Ziegelwerk baut derzeit eine eigene Produktionslinie zur industriellen Herstellung der Geopolymer-Steine auf. Dabei besteht ein enger Schulterschluss mit der Recycling- und Kreislaufwirtschaft in Spanien.

#### 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 21).



Abbildung 21: Durch Rühren homogenisierte Geopolymer-Paste (l); Einfüllen der homogenisierten Geopolymer-Paste in Prismen-Formen aus Silikon (r)

Für die Aushärtung werden die Geopolymer-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 Proben entformt und auf ihre werkstofftechnischen Kennwerte Druckfestigkeit, Biegebruchfestigkeit, Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit geprüft. Von besonderem Interesse ist auch, die Morphologie der erhaltenen künstlichen Steine mittels Rasterelektronenmikroskop zu untersuchen.

## Ergebnisse

In Abbildung 22 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 22 sind auch die korrelierenden Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Geopolymer-Steine aus Ziegelschleifstaub und aus fein gemahlenem 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.

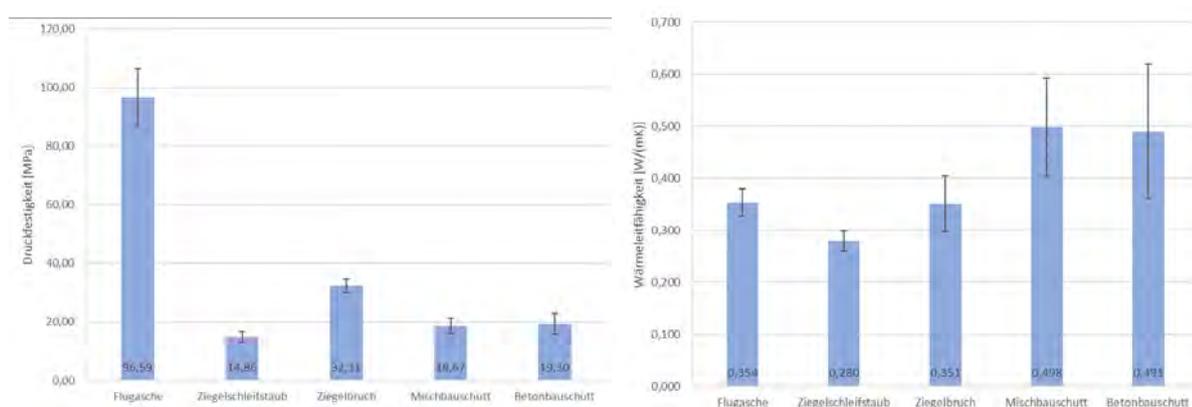


Abbildung 22: Mittelwerte der Druckfestigkeiten (l) und Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{10, tr}$  (r) von Geopolymer-Steinen

Abbildung 23 bis Abbildung 27 zeigen REM-Aufnahmen der Bruchflächen der hergestellten Geopolymere. Abbildung 23 zeigt die Bruchfläche eines aus Ziegelschleifstaub hergestellten Geopolymers. In Abbildung 24 ist die Bruchfläche eines Geopolymers aus Ziegelbruch und in Abbildung 25 ist die Bruchfläche eines Mischbauschutt-Geopolymers zu sehen. Ein

Geopolymer aus Betonbauschutt ist in Abbildung 26 dargestellt und Abbildung 27 zeigt ein Geopolymer aus Flugasche. Dabei sind die runden Flugasche-Partikel, die Matrix und kristalline Phasen zu erkennen.

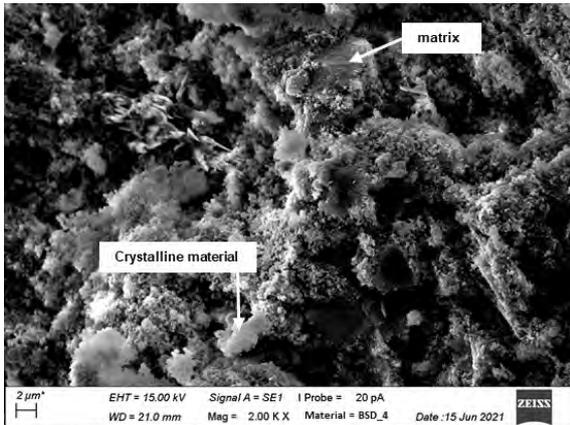


Abbildung 23: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines aus Ziegelschleifstaub hergestellten Geopolymers bei 2 kx Vergrößerung

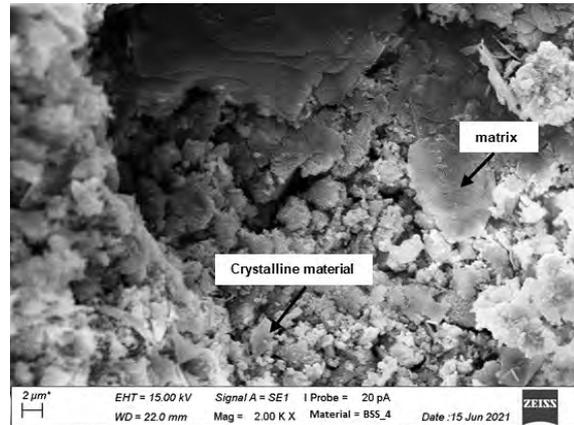


Abbildung 24: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines aus Ziegelbruch hergestellten Geopolymers bei 2 kx Vergrößerung

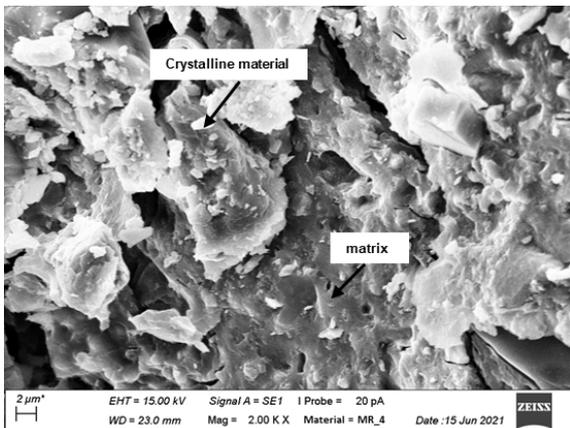


Abbildung 25: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines aus Mischbauschutt hergestellten Geopolymers bei 2 kx Vergrößerung

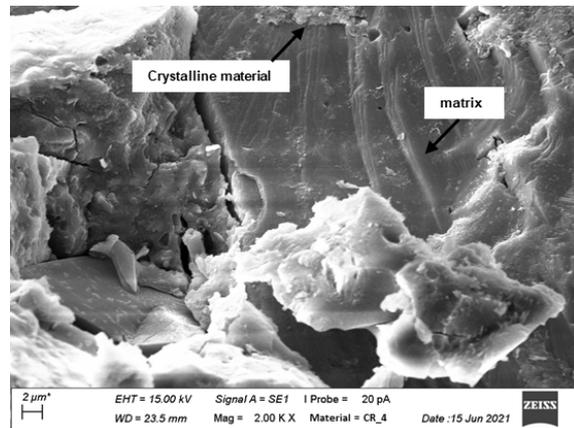


Abbildung 26: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines aus Betonbauschutt hergestellten Geopolymers bei 2 kx Vergrößerung

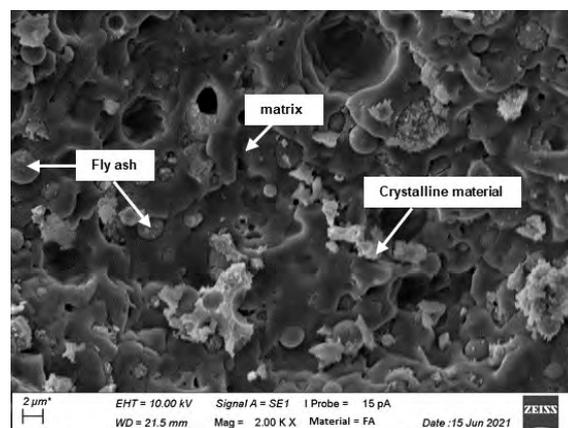


Abbildung 27: REM-Aufnahme der Bruchfläche eines aus Flugasche hergestellten Geopolymers bei 2 kx Vergrößerung

## 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 die Flugasche-, 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.

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass die Matrixphasen in allen alkalisch aktivierten Materialien vorhanden sind und die Geopolymerisation jeweils wie vermutet stattgefunden hat. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass das Flugasche-Geopolymer den vergleichsweise größten Anteil an Geopolymer-Matrix ausgebildet hat, was die höchsten Druckfestigkeiten erklärt. Erstaunlich ist, dass das Ziegelbruch-Geopolymer bessere Festigkeiten ausbildet, als die Misch- und Betonbauschutt-Fractionen.

### 1.1.6 „Versuchsbetrieb eines gasbefeuerten 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 Mikrobauerteile kleinster Abmessungen, z.B. Spulenkörper aus Steatit, im Tunnelofen bei höchsten Temperaturen gesintert. Dabei sintern die Mikrobauerteile, 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 Mikrobauerteile 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 Brennkamin messtechnisch ermittelt. Wenn die Versuche erfolgreich verlaufen, beginnen die Brennversuche mit Wirbelgut. Nachfolgend sind die zu sinternenden keramischen Mikrobauerteile gezeigt sowie eine Prinzipskizze und ein Bild des Wirbelsinter-Versuchsofens. Das Vorhaben wird freundlicherweise von der STAEDTLER-Stiftung in Nürnberg gefördert.

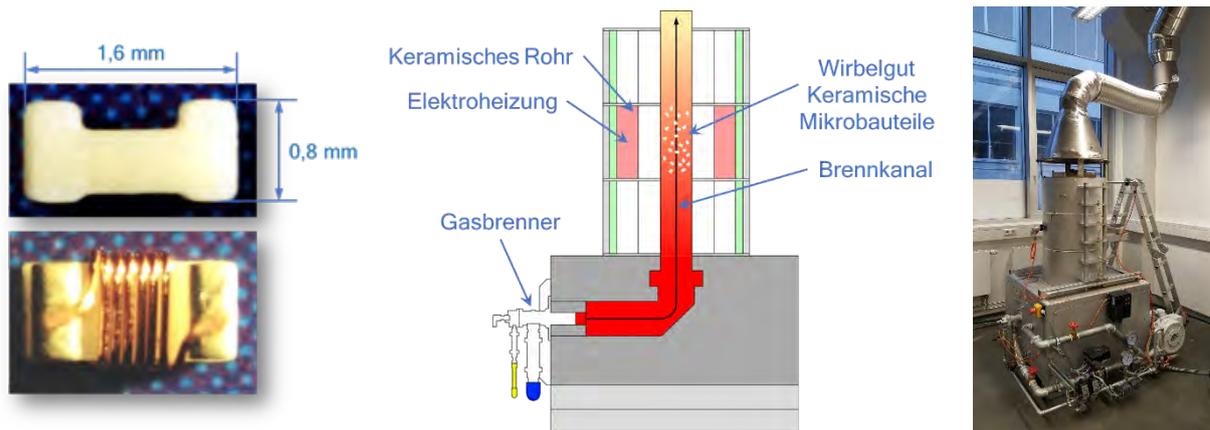


Abbildung 28: Kleinteilige Spulenkörper aus Elektrokeramik die bei höchsten Temperaturen gesintert werden müssen, ohne (links oben) und mit Spulenwicklung (links unten). Prinzipskizze des Wirbelsinter-Ofens mit angedeutetem Wirbelgut (mitte). Realisierter Wirbelsinter-Versuchsofen für das Brennen keramischer Mikrobauteile kleinster Abmessungen (rechts).

### 1.1.7 Patente

Im Berichtszeitraum wurden zwei Patentanmeldungen bearbeitet mit dem Titel „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“. Dabei handelt es sich um eine europäische Patentanmeldung (EP 18 811 202.3) sowie eine deutsche Patentanmeldung (DE 10 2017 128 150 A1). 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- und/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. Das EU-Patent befindet sich unmittelbar vor der Erteilung.

## 1.2 Teilautarke adaptive Technikfassade

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

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 und 2020 technisch erweiterte und angepasste Versuchstand zum praktischen Betrieb einer elektrisch aktiven Fassade mit gedruckter organischer Photovoltaik (OPV) wurde auch im Jahr 2021 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 2021 am OPV Versuchsstand war der Umbau der Anordnung der OPV-Streifen zur Leistungsoptimierung des PV-Generators. Um den erzielten Ertrag des OPV-Messstands am Keßlerplatz zu erhöhen wurde der aktuelle Aufbau analysiert, Probleme abgeleitet und mögliche Lösungen herausgearbeitet.

In Abbildung 29 ist zu erkennen wie die einzelnen OPV-Streifen am Fenster im Raum KA.028 der TH Nürnberg bis zur letzten Optimierung angebracht waren. Weiter lässt sich hieraus ableiten, dass je sechs Streifen in Reihe zu einem String geschaltet wurden. Hieraus ergab sich die dort angegebene Anordnung von vier Strings, welche parallelgeschaltet sind und der Einspeisung in die Batterie dienen.



Abbildung 29: Anbringung der OPV-Streifen und String-Verschaltung bis zur letzten Optimierung

Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde der Strom der einzelnen Strings in Reihe gemessen. Hierbei fiel auf, dass String 1 keinen Strom erzeugte. Grund dafür war, dass zu diesem Zeitpunkt die beiden Streifen ganz links komplett verschattet waren, dadurch die Spannung des Strings unter den Grenzwert der Sperrperiode fiel und diese dafür sorgte, dass der gesamte String ausfällt. Um dieses Problem zu lösen und so den Ertrag des Messstandes zu erhöhen, wurden sich Gedanken über die Änderung der Anordnung der Streifen und Definition der Strings gemacht. Ziel war es dadurch zu erreichen, dass keine Streifen mehr komplett verschattet sind und so eventuell zum Ausfall des gesamten Strangs führen. Es wurden mehrere Varianten für die neue Anbringung der Streifen betrachtet und sich auf die in Abbildung 30 dargestellte Version verständigt. Durch die gedrehte Anbringung werden die linken Streifen nicht komplett verschattet und es kommt nur zu einer Ertragsminderung durch den Schattenwurf, aber nicht zu einem kompletten Ausfall eines oder mehrerer Stränge.

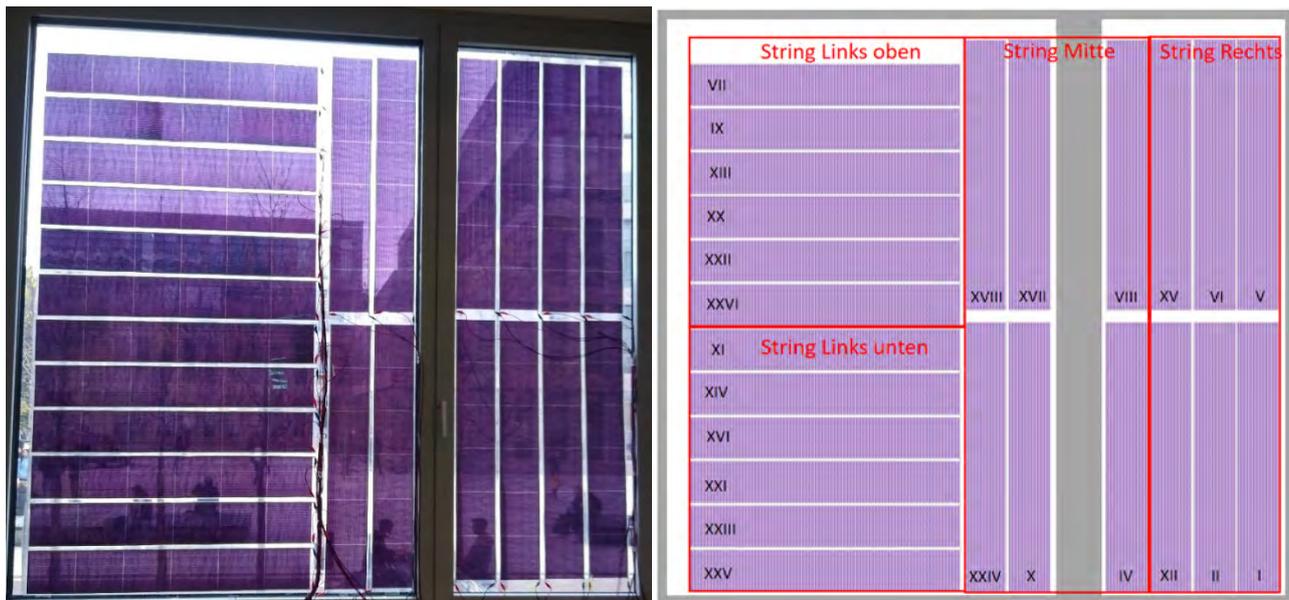


Abbildung 30: Anbringung der OPV-Streifen und String-Verschaltung seit der letzten Optimierung

Damit die OPV-Anlage fehlerfrei funktioniert und es nicht zum Ausfall einzelner Strings kommt, ist es wichtig, dass sich diese in ihren Kenngrößen ähneln. Aus diesem Grund wurden die Daten aller einzelnen Module, welche im Sonnensimulator vermessen wurden, anhand ihrer Widerstände, Spannungs-, Strom- und Leistungswerte im MPP analysiert und lösungsorientiert kombiniert. Anhand der neuen Zuordnung von Streifen und Strings konnten diese auf die Stringanordnung in Abbildung 30 übertragen werden. Die Stränge wurden so definiert, dass die oben geschilderten Bedingungen erfüllt wurden und anschließend verständlich benannt.

Ziel des Umbaus war es die Verluste durch Verschattung zu minimieren und so den Ertrag der OPV-Module zu erhöhen. Um zu verifizieren, dass dieses Ziel durch die geänderte Anbringung der Streifen und neue Verschaltung der Strings erreicht wurde, müssen über einen längeren Zeitraum weitere Messungen erfolgen und mit den älteren Daten verglichen werden. Es empfiehlt sich bei schlechten Bedingungen, die bisher für den Ausfall des einen Strings gesorgt hatten, die einzelnen Stränge zu vermessen und so sicher zu gehen, dass dieses Problem behoben wurde.

### 1.2.2 Konstruktive Entwicklung und bauphysikalische Bewertung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden; Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Prof. Dr. Gunnar Grün

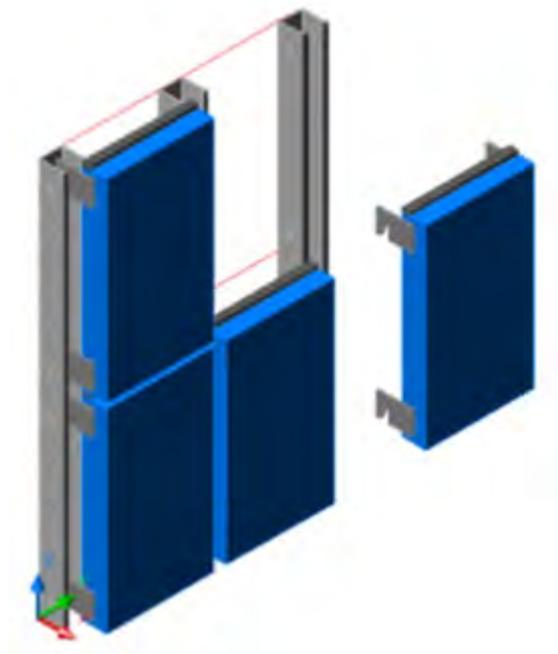
Die Mehrzahl der Gebäude in Deutschland, aber auch in Europa, befindet sich mittlerweile in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Im Rahmen der anstehenden Sanierungsmaßnahmen bietet die Aktivierung der Gebäudehülle mit Photovoltaik (PV) in Kombination mit Wärmedämmung die Chance, eine lokale Stromerzeugung in solchen Gebäuden zu erschließen und dem Gebäude eine moderne und zukunftsorientierte Gestaltung zu geben. 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 in eine passende Konstruktion 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. Hierfür eignen sich vor allem vorgehängte Fassadensysteme, welche häufig auf einem metallischen Grundgerüst basieren – z.B. Glas-Stahl- oder Glas-Aluminium-Fassaden und meist als Pfosten-Riegel- oder Elementfassaden-Konstruktion ausgeführt werden.

Zunächst wurden die wesentlichen Materialien und Komponenten ausgewählt. Wesentlich für PV-Fassaden ist die kritische Berücksichtigung des Brandschutzes. PV-Module enthalten typischerweise eine Schicht von in etwa 2 mm Silikon oder ähnlichen brennbaren Materialien, die die eigentlichen PV-Zellen einbetten. Dies ist brennbares Material, so dass ein Modul nicht als nichtbrennbares Bauteil nach Klasse A1 oder A2 angenommen werden kann. Zudem stellen die

erforderlichen elektrischen Komponenten, vor allem auch die Kabel mit ihren Umhüllungen, Brandlasten dar. Dies hat unter anderem zur Konsequenz, dass tragende Teile nicht aus Leichtmetall (z.B. Aluminium), sondern nur aus Stahl oder Edelstahl verwendet werden können, Brandriegel in Höhe der Geschossdecken eingebaut werden müssen, die fest und hohlraumfrei auf der Oberfläche der darunterliegenden Wand aufliegen müssen, Elektrokabel über die gesamte Höhe in Brandschutzkanälen verlegt werden müssen.

Nach Analyse unterschiedlicher Möglichkeiten wird hier die Anwendung von Elementfassaden basierend auf vertikalen Lisenen als statische Tragstruktur gewählt. Diese können gleichzeitig für die Kabelführung verwendet werden und erlauben den Abfluss von Regenwasser sowie eine optimierte Montage mittels Einhängelbolzen (siehe Abbildung 31).



*Abbildung 31: Prinzip der Elementfassade mit vertikalen Lisenen*

Üblich ist eine Montage der Lisenen von unten nach oben. Alternativ können die Lisenen auch vom Dachrand abgehängt werden, so dass die Hauptlast über das Dach und nicht die Verankerung in der Unterkonstruktion der Wand abgetragen wird. Die tragenden Profile werden hier aus Edelstahl (V2A) gewählt, um den Anforderungen aus dem Brandschutz zu genügen: der Schmelzpunkt von Leichtmetallen (z.B. Aluminium:  $\Theta = 660 \text{ °C}$ ,  $\lambda = 220 \text{ W/mK}$ ) ist zu niedrig, zudem wirkt sich die niedrigere Wärmeleitung von Edelstahl ( $\Theta = 1400 \text{ °C}$ ,  $\lambda = 21 \text{ W/mK}$ ) auch hinsichtlich des Wärmeschutzes positiv aus. Die Lisenen werden aus U-Profilen so konstruiert, dass die Integration der Kabelkanäle mit einer Zugänglichkeit von außen ermöglicht wird. Die Kabelkanäle müssen für die feuersichere Einkapselung der Verkabelung als Metall-Brandschutzkanal zur Kapselung von Brandlasten mit aktiver Brandhemmung ausgeführt werden.

Basierend auf diesen Materialien und Komponenten erfolgten, in Abstimmung mit den Erkenntnissen aus der Systemsimulation und der Stromversorgung, der Entwurf des konstruktiven Aufbaus und die einhergehende Integration der Komponenten. Die Konstruktionsdetails wurden ausgearbeitet und prototypisch untersucht, um insbesondere die besonderen Anforderungen an den Brandschutz und die elektrische Sicherheit zu berücksichtigen.

Aufgrund der enthaltenen brennbaren Materialien – sei es in den PV-Modulen selbst oder der elektrischen Versorgung – sind insbesondere bei Bauwerken über 22 m erhöhte Anforderungen seitens des Brandschutzes zu beachten. Zudem sind PV-Anlagen Niederspannungsanlagen und fallen damit in den Anwendungsbereich der Norm DIN VDE 0100. Demzufolge dürfen solche Anlagen nur durch Elektrofachkräfte errichtet werden. Die Montage darf jedoch auch durch andere Handwerker erfolgen, sofern dies mit ihrem Leistungsangebot unmittelbar zusammenhängt – bei vorgefertigten Konstruktionen, wie der hier konzipierten, wäre dies der Fall und es muss daher eine Konstruktion gewählt werden, die sowohl eine Montage durch Handwerker anderer Fachrichtungen ermöglicht, als auch eine Prüfung und Wartung durch Elektrofachkräfte erlaubt. Diese Arbeiten sollten jedoch immer nach Einweisung und Aufsicht durch einen Elektromeister erfolgen. Der letztliche Anschluss an das elektrische Netz darf nur durch einen Elektromeister erfolgen. Die Konstruktion

und Fertigung der entsprechenden Module muss entsprechend zwei weitere Kriterien erfüllen: zum einen sollte die Vorkonfektionierung durch einen Elektrofachbetrieb erfolgen können und zum zweiten sollte sich die Montage auf das Zusammenstecken auch der elektrischen Verbinder beschränken.

Unter diesem Gesichtspunkt wurde eine Hängekonstruktion mit Lisenen entwickelt, dass die Kabelführung so erfolgen kann, dass die Steckverbindungen einfach während des Montageprozesses aus der Konstruktion herausgezogen werden können (siehe Abbildung 32).



*Abbildung 32: Prototyp einer offenen Lisene mit Kabelführung – zu erkennen sind: Aus- und Einfädungen sowie die Befestigung der Kabel an einer Zugentlastung*

Zudem wurde ein Kabelkanal verwendet, der im Brandfall zuschäumt und damit Rauch- und Brandausbreitung unterdrückt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf Kabeldurchführungen gelegt, die sowohl im Brandfall Schwachstellen darstellen, als auch bei der Montage gewährleisten müssen, dass die Kabelführung keinen Schaden, z.B. durch scharfe Kanten, nimmt. Durch die langen, vertikal hängenden Kabelführungen sind zudem ausreichend Zugentlastungen vorzusehen, die schon bei der Vorkonfektionierung fertig hergestellt sein müssen, um den Montageprozess nur auf das Stecken zu reduzieren. Um die Kabelmenge – und damit auch die Brandlast sowie Komplexität in der Verkabelung - weiter zu reduzieren wurde ein Konzept basierend auf einem Wechselstrombus entwickelt. Statt eines internen Gleichstromnetzes mit einem gemeinsamen Wechselrichter und serieller Verschaltung der Module werden Modulwechselrichter vorgesehen, die wechselseitig parallel betrieben werden können.

Eine solche Fassadenkonstruktion wurde u.a. basierend auf den hier erfolgten konstruktiven Entwicklungen im Rahmen des Projektes PV-HoWoSan aufgebaut und einem Brandversuch unterzogen. Die daraus resultierenden Messergebnisse wurden anschließend verwendet, um eine bauphysikalische Bewertung hinsichtlich der Brandsicherheit der Befestigungspunkte und beanspruchten Wärmebrücken durchzuführen.

Im Rahmen des o.g. Brandversuches wurde ein Photovoltaiksystem mit neu entwickeltem Befestigungssystem zur Aufhängung an einer Fassade originalmaßstäblich brandschutztechnisch geprüft. Als Unterbau des Brandprüfmodells wurde ein 24 cm starkes Mauerwerk aus Kalksandsteinen versehen mit einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) mit 14 cm Steinwolle erstellt. Das Photovoltaiksystem wurde vor das WDVS mittels einer Edelstahlunterkonstruktion gehängt. Die Edelstahlunterkonstruktion besteht unter anderem aus vertikalen Lisenen, welche quer durch mehrere Brandriegel miteinander verbunden sind. Zur Sicherung und Aufnahme von horizontalen Lasten wird jeder Brandriegel an zwei an der Wand vormontierten Anker angeschlossen und mit diesen verschraubt. Die Befestigung der Anker an der Wand erfolgt mittels zwei Gewindestangen. Ein Anker besteht aus einer Stahlplatte, welche von beiden Seiten mit Calciumsilikatplatten

umhüllt ist. Die Calciumsilikatplatten haben unter anderem die Aufgabe für die thermische Entkopplung zu sorgen. Mittig der Stahlplatte befindet sich eine Gewindehülse, welche bis an die Vorderkante des WDVS reicht. An der Gewindehülse wird ein U-Stück befestigt, an welchem wiederum das Edelstahlprofil des Brandriegels angeschraubt wird. Das Edelstahlprofil des Brandriegels wird mit Steinwolle ausgestopft. Die thermische Auswirkung infolge eines Brandes an der Dämmung wird mit Hilfe einer Simulation mit dem dynamischen Computerprogramm VOLTRA des Softwarehauses Physibel, welches auf der Basis des finite-Differenzen-Verfahrens arbeitet, untersucht, um abschätzen zu können, ob sich brandkritische Temperaturen in diesem Bereich einstellen können. Als Modell wird der Unterbau mit einem Anker und darauf befestigten Brandriegel simuliert. Die Materialien sowie die angenommenen Kennwerte sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Materialeigenschaften einzelner Bestandteile der Ankerkonstruktion und des Brandriegels.

Bezeichnung	Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte	spez. Wärmekapazität
	-	W/mK	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK
Gewindestange	Stahl	50,0 <sup>1)</sup>	7800	450 <sup>1)</sup>
Ankerplatte	Stahl	50,0 <sup>1)</sup>	7800	450 <sup>1)</sup>
Gewindestange mit Gewindehülse	Edelstahl	15,0 <sup>2)</sup>	7900	500 <sup>2)</sup>
Calciumsilikatplatten	Calciumsilikat	0,066 <sup>3)</sup>	225	1000
U-Profil (Anker)	Edelstahl	15,0 <sup>2)</sup>	7900	500 <sup>2)</sup>
U-Profil (Brandriegel)	Edelstahl	15,0 <sup>2)</sup>	7900	500 <sup>2)</sup>
Füllung Brandriegel	Steinwolle	0,034 <sup>4)</sup>	95 / 175	840

1) Temperaturabhängig nach DIN EN 1993-1-2

2) Temperaturabhängig nach DIN EN 1993-1-2

3) Temperaturabhängig nach Wulf (2009): Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen

4) Temperaturabhängig gemäß Herstellerangabe Datenblatt Rockwool „Prorox-sl-970“

In der Simulation des im Brandversuch verwendeten Fassadenaufbaus konnte das nach 90 min Brandversuch erreichte Temperaturniveau gut nachgebildet werden (siehe Abbildung 33). Die Temperaturdynamik konnte dabei nur zeitverzögert, jedoch mit ähnlichem Verlauf abgebildet werden, was auf in der Versuchsdokumentation nicht erfasste Brandvorgänge hinweist, die für die Bewertung des nach 90 min erreichten Temperaturniveaus jedoch nicht mehr von entscheidender Bedeutung sind.

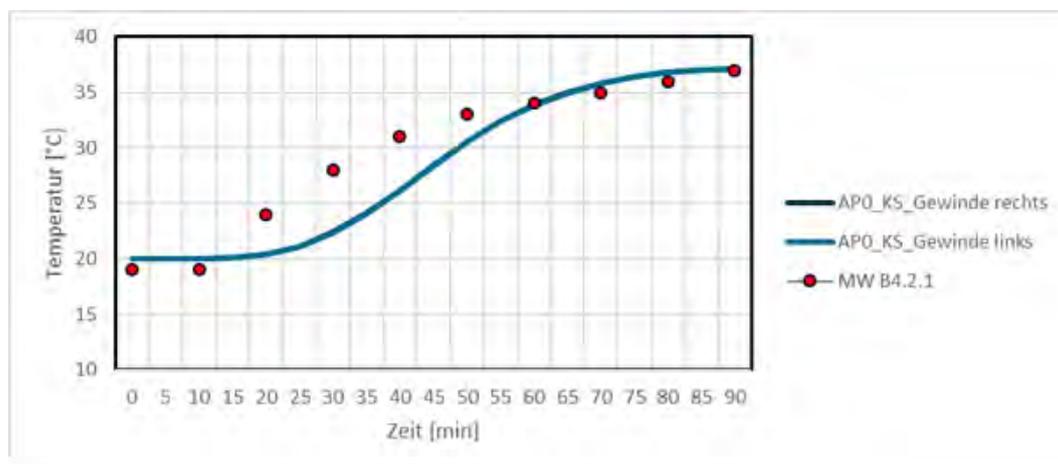
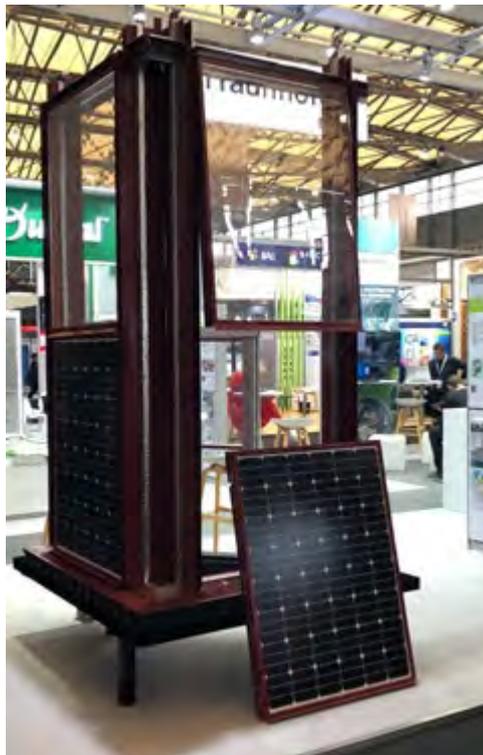


Abbildung 33: Prototyp Vergleich des Temperatur-Zeit-Verhaltens der gemessenen Werte an einer äußeren Gewindestange 3 cm in der Kalksandsteinwand aus dem Brandversuch mit den simulierten Werten jeweils an der linken und der rechten Gewindestange.

In gleicher Tendenz lassen sich die simulierten Temperaturverläufe auch an den Auswertepunkten vor und hinter der Dämmung feststellen, wenngleich auf niedrigerem Temperaturniveau. So werden in der Simulation nach 90 min vor der Dämmung Temperaturen von knapp 28 °C und hinter der Dämmung von knapp 24 °C erreicht und zeigen, dass die gewählte Befestigung, trotz Eigenschaften einer Wärmebrücke, im Brandfall keine kritischen Temperaturen verursacht.

Für die hier entwickelte und mittels bauphysikalischer Berechnungen ausgelegte bzw. bewertete Fassadenkonstruktion wurde schließlich ein Mock-up aufgebaut (siehe Abbildung 34), um die Prinzipien der Konstruktion und die Funktionsweise der integrierten Fassade zu zeigen.



*Abbildung 34: 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 Einhängpunkten für die Fassadentafeln. Die Fassadentafeln sind unterschiedlich bestückt: u.a. mit PV-Modulen, Aluminiumplatten, Faserzementplatten, Isolierglas, Einscheibensicherheitsglas. Die Fassade kann als Warm- und Kalfassade 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 35), hierbei entstehen verwölbte Flächen die durch die verwendeten Tafeln (Ausnahme: Standard-Isolierglas) aufgenommen werden können. Die modulare Technikfassade wurde basierend auf diesem Entwurf vollständig digital geplant und vorgefertigt (siehe Abbildung 36).

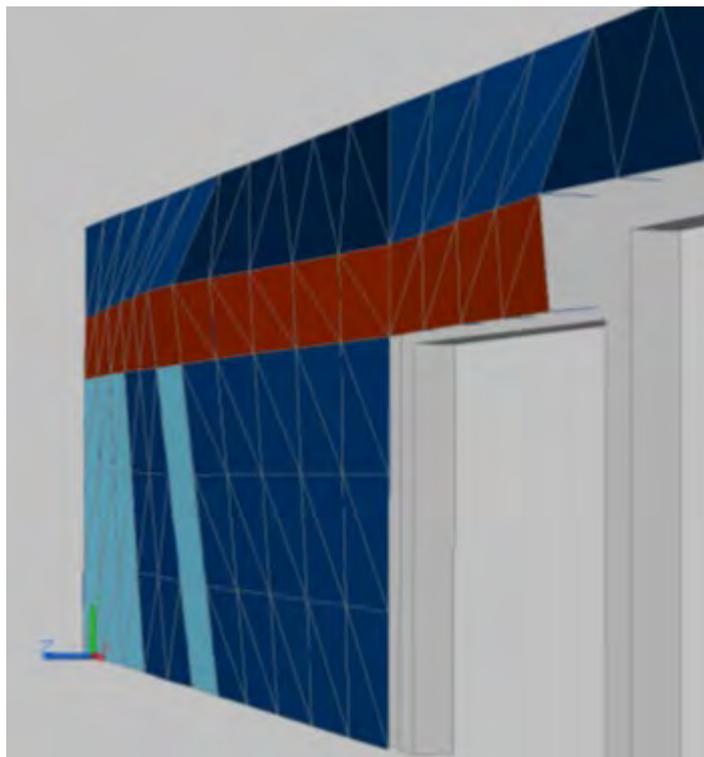


Abbildung 35: Perspektivische Darstellung eines Fassadenausschnitts. Die eingezeichneten Diagonalen dienen der Darstellung der verwölbten Flächen, die Farben stellen die unterschiedlichen Materialien dar (dunkelblau: PV-Module, blau: Aluminium, hellblau: Glas, weinrot: Faserzement).



Abbildung 36: Vorgefertigte Fassadentafeln mit integrierten PV-Modulen (links), Lisenenstücke (mittig) und palettierte Fassadenmodule für den Transport (rechts).

Bauseits wurden schließlich die Konsolanker an das Versuchsgebäude auf dem Testgelände des Fraunhofer IBP gedübelt, die Montageeinheiten aus je 4 Teilen (Ring- und Lisenenstücke) zusammengeschraubt und in die Konsolen eingehängt sowie die gebrauchsfertigen und integrierten Tafeln eingehängt (siehe Abbildung 37). Die Elemente mit integrierter Photovoltaik befinden sich dabei aufgrund der Verschattung durch ein Gebäude im obersten Bereich der Westfassade (siehe Abbildung 38). Diese wurde insbesondere auch gewählt, um den Wasserablauf durch erhöhte Schlagregenbeanspruchung zu beobachten. Hierfür wurde in der Konstruktion eine elementweise Wasserführung vorgesehen, die ein Ablaufen von Element zu Element verhindern soll.



*Abbildung 37: Ansicht der fertig eingehängten Elementfassade am Versuchsgebäude, farblich voneinander unterscheidbar sind die unterschiedlichen Materialien – die Elemente mit integrierter Photovoltaik befinden sich in der obersten Reihe.*



*Abbildung 38: Detailansicht der am Versuchsgebäude montierten Elemente mit integrierter Photovoltaik.*

### 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 „Fassade<sup>3</sup>“ 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 und 2021 laufende 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. Im Rahmen des Projekts werden zwei Masterarbeiten betreut. Planungsbüros und Fachmagazine haben bereits Interesse an dem Projekt bekundet.

Im Kontext dieses Forschungsbereichs wurden für die Ausschreibung „Strukturbildende Verbundprojekte am Energie Campus Nürnberg“ zwei Projektskizzen eingereicht. Die vorläufige, interne Begutachtung verlief positiv, daher werden 2022-01 zwei Vollarträge dazu eingereicht. Vorgesehene Projektlaufzeit ist 2022-2024. In dem geplanten Projekt „OPVplus“ werden themen- und institutsübergreifend je zwei Arbeitsgruppen der FAU und der THN, die bereits am EnCN tätig sind, zusammenarbeiten. Ziel ist die Entwicklung einer drucktechnisch hergestellten Hybrid-Optoelektronik auf Basis Organischer Photovoltaik (OPV), welche an Fenstern/Verglasungen eingesetzt wird und die Funktionen „schaltbare Abdunklung“ (elektrochrom, als Sonnenschutz und Blendschutz) sowie eine Stromerzeugung (Photovoltaik) vereint. Der positive Effekt eines solchen Systems auf die Gebäudeeffizienz und Energieerzeugung wird durch experimentelle Studien, Messungen und Simulationen untersucht. In dem geplanten Projekt „Quartier Opt“ werden je eine Gruppe der FAU und THN themen- und institutsübergreifend tätig sein. Ziel des Projekts ist die Verknüpfung und Weiterentwicklung bestehender Kompetenzen und Modelle zur Untersuchung von lokalen Energiesystemen im städtischen Quartier. Dafür werden in Zusammenarbeit der FAU und der THN technisch-ökonomische Modelle zur Optimierung der technischen Konfiguration und des Betriebs erstellt. Diese ermöglichen eine umfangreiche Basis zur Untersuchung sich wandelnder Einflussgrößen und Rahmenbedingungen in Quartieren (Wohnen, Mischgebiete).

**„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.Eng. Nils Hupp, M. Sc. Marius Ketterer**

In der zweiten Förderphase des EnCN konnte durch Vorarbeiten im Rahmen des Teilprojekts „energieeffiziente Gebäudehülle“ das Forschungsprojekt „Fassade<sup>3</sup> – 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 im Jahr 2020 nochmals 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 letzten Projektjahr stehen daher die Umsetzung der neu entwickelten Fassade an einem Demonstrationsgebäude in Kitzingen und die Vorbereitung des Monitorings im Fokus. Der Bau der Demonstrationsfassade erfolgt im Dezember 2021.

Fassade<sup>3</sup> verfolgt den baukonstruktiven Ansatz einer nachrüstbaren vorgehängten Elementfassade. Das Set der einzelnen Elemente besteht aus Aluminiumrahmen mit mehreren eingesetzten Komponenten, welche in einer vordefinierten Reihenfolge zu einer Gesamtfassade zusammengebaut werden können. Abbildung 39 zeigt ein Fassaden-Mock-up, das 2020 im INNOPARK Kitzingen installiert wurde.



*Abbildung 39: Mock-up der Demofassade an einem Gebäude im INNOPARK in Kitzingen*

Die Elemente der energieerzeugenden Fassade bestehen aus mehreren Schichten. Von innen nach außen folgt auf Bestandswand und weiche Dämmung eine nachhaltige Dämmung des Unterauftragnehmers Bio-Composites And More GmbH. Auf die Dämmschicht folgen wenige Zentimeter Hinterlüftung, welche sowohl dem bauphysikalischen Bauteilschutz wie auch der Kabelführung innerhalb des einzelnen Elements dient. Umlaufend um die einzelnen Komponenten wird alles von einem Aluminiumrahmen zusammengehalten. Abgedeckt wird dieser Rahmen von einer Trägerplatte mit organischer Photovoltaik. Vertikal gliedert sich die Elementfassade in drei Bereiche. Der Oberlichtbereich der Elementfassade beherbergt einen aufgerollten textilen Sonnenschutz und wahlweise eine Klemmleiste mit frei auskragenden Verbundglasscheiben mit einlaminiertes organische Photovoltaik (Vordach) (Abbildung 40). Sollte das Vordach weggelassen werden, besteht die Möglichkeit den textilen Sonnenschutz mit organischer Photovoltaik auszustatten, um dennoch im Fensterbereich Strom zu erzeugen. Zusätzlich dient der Oberlichtbereich der elektrischen

Kabelführung. Vor Bestandsfenstern wird das vorgehängte Element ausgespart. Hier wird lediglich ein Leibungsblech zum Anschluss an die Bestandsfassade angebracht, welches eine Calciumsilikat-Platte mit hohen Brandschutzeigenschaften beinhaltet. Der Brüstungsbereich besteht aus einer Dämmung in einem umlaufenden Aluminiumrahmen, welcher mit organischer Photovoltaik zwischen Polycarbonatplatten bedeckt ist.

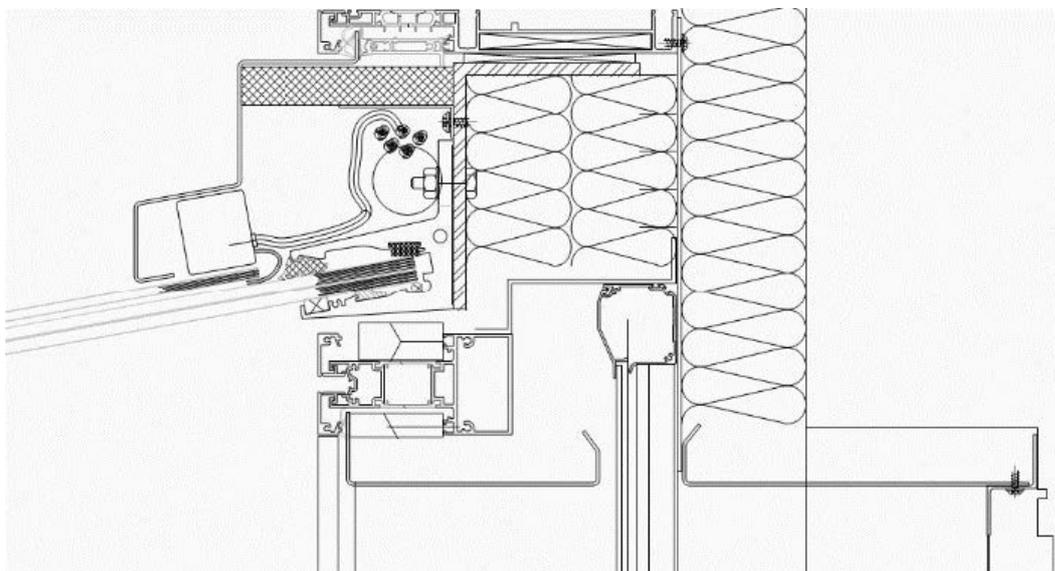


Abbildung 40: Anschlussdetail der Elementfassade im Oberlichtbereich (Entwurfszeichnung von a.t.f., maßstablos)

Der Anschluss an die Bestandsfenster geschieht über Manschetten aus gedämmten Blechpanelen, die auf die Bestandsleibung aufgesetzt werden. Für den konstruktiven Anschluss der Elementfassade an die statisch wirksame Bestandswand wurde ein System mit Punkthaltern gewählt. Zwischen der Bestandswand und der neu entwickelten Fassade soll eine Schicht weicher Wärmedämmung die Unebenheiten ausgleichen.

Neben der Energieerzeugung ist eine weitere hervorzuhebende Funktion der multifunktionalen Fassade der sommerliche Wärmeschutz. Der Überhitzung des Gebäudes im Sommer wirken zwei Systeme entgegen. Der selektive textile Sonnenschutz des Projektpartners Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH befindet sich aufgerollt im Sturzbereich jeder Fensteröffnung. Da der Fc-Wert des textilen Sonnenschutzes vergleichsweise niedrig ausfällt, wird dieser durch einen horizontalen Sonnenschutz unterstützt. Der horizontale Sonnenschutz besteht aus einem Dreischeiben-Verbund. Die unteren beiden Scheiben dienen der statischen Stabilität, die obere Scheibe dem Witterungsschutz der OPV. Die Solarzellen werden daher zwischen der obersten und der zweitobersten Scheibe einlamiert. Für den Raumnutzer soll der Eindruck eines Blätterdachs entstehen (Abbildung 41). Vorteilhaft ist bei der Kombination der beiden Systeme, dass der horizontale sommerliche Wärmeschutz sich außerhalb des Sichtfeldes befindet und nur die hochstehende Sommersonne verschattet. Der textile Sonnenschutz hingegen befindet sich direkt vor dem Fenster und kann daher in den Wintermonaten zusätzlich die Funktion des Blendschutzes übernehmen, welchen der horizontale Sonnenschutz nicht leisten kann.



*Abbildung 41: Montage des horizontalen sommerlichen Wärmeschutzes am Mock-up mit Blick auf die Anordnungsstrategie der organischen Photovoltaik*

Anhand eines Mock-ups im INNOPARK Kitzingen konnte der Aufbau erprobt und das Konzept zur Verkabelung detailliert geplant werden. Die Glasvordächer des ZAE Bayern werden alle parallelgeschaltet und an einen Mikro-Wechselrichter angeschlossen. Aufgrund kurzfristiger Änderungen beim Design der OPV-Fassadenpaneele der ARMOR solar power films GmbH werden hier jeweils drei Fassadenpaneele in Reihe geschaltet. Jeweils drei dieser Reihen werden pro Stockwerk parallelgeschaltet und versorgen einen separaten Mikro-Wechselrichter. Der weiterführende Verbund der Wechselstrom-Ausgänge für eine Einspeisung in das Niederspannungsnetz wurde geplant und an den INNOPARK zur Durchführung übergeben. Ein weiteres Ergebnis der Voruntersuchungen war die Entwicklung des Leitungsführungskonzepts. Aufgrund von baulichen Änderungen in Folge der Anpassung an den Brandschutz, haben sich die Maße des Kabelkanals deutlich verringert. Daher wurden die ursprünglich vorgesehenen Verbindungsstücke durch Y-Kabel ersetzt, welche eine platzsparende, flexibel einsetzbare Alternative darstellen. Diese lassen sich so einsetzen, dass sich möglichst wenige der sperrigen Teile überlagern. Um sicherzustellen, dass das neue Verkabelungskonzept in den Kabelkanal passt, wurde dieser testweise aufgebaut und auf die Durchführbarkeit getestet. Anhand von Abbildung 42 lässt sich erkennen, wie die Leitungsführung zukünftig aussehen wird und wie viel Freiräume darin enthalten sind.

Um eine schnelle und fehlerfreie Verkabelung auf der Baustelle zu gewährleisten, wurden die benötigten Kabel vorkonfektioniert (passende Längen, Ausrüstung mit MC4-Steckern, bzw. –Buchsen) und mit einer Farbcodierung versehen.

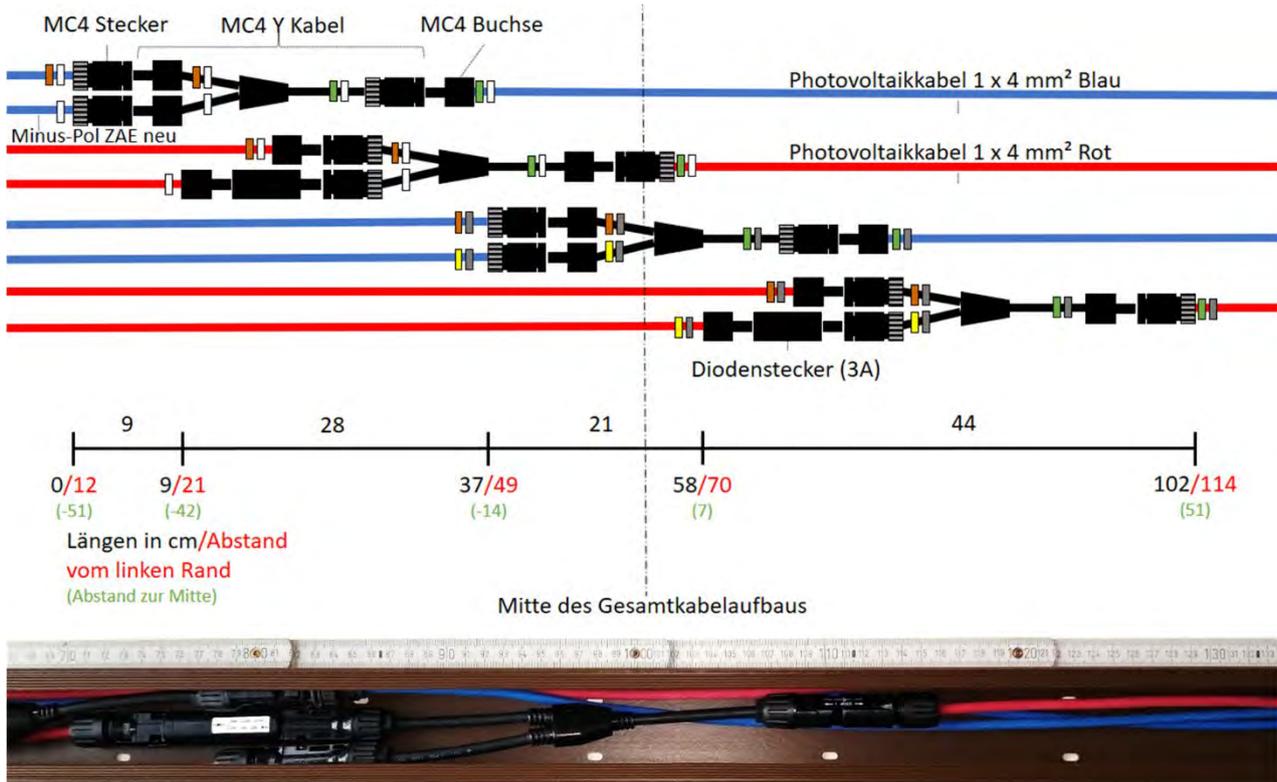


Abbildung 42: Anordnung der Kabelführung im Kabelkanal

Nach dem Bau der Demonstrationsfassade im Dezember 2021 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. Das Innenraum-Monitoring sieht vor, zwei Räume, die sich hinter der neuen Fassade befinden werden, mit zwei Räumen, die hinter der unsanierten Fassade liegen, messtechnisch zu vergleichen. Zur Vorbereitung wurden im ersten Quartal 2021 in Abstimmung mit der ifm Software GmbH und dem INNOPARK Kitzingen die vier Wohneinheiten mit der erforderlichen Mess- und Datenerfassungstechnik ausgestattet. In jedem der Apartments wurde ein Raumsensor zur Messung der Raumlufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Helligkeit montiert (Abbildung 43). Direkt an den Wandheizkörpern wurde ein Wärmemengenzähler je Wohneinheit in den Heizungsrücklauf integriert (Abbildung 44). Die zwei Wohneinheiten, die sich hinter der neuen OPV-Fassade befinden werden, wurden zusätzlich mit einem thermoelektrischen Heizungsstellantrieb ausgestattet, um eine automatische Regelung von Sonnenschutzbehang und Heizung in diesen Räumen zu ermöglichen. Das Stellsignal der Heizungsregelung wird von einem Raspberry Pi übermittelt, der im Sicherungskasten jeder Wohneinheit installiert wurde (Abbildung 45). Zusätzlich wurde ein Stromzähler in jeden Sicherungskasten integriert (Abbildung 46). Hauptaufgabe des Raspberry Pis ist die Messdatenerfassung und -übertragung per Funk (LoRa) an einen Mini-PC im Technikraum des Boardinghauses, auf dem die zentrale Datenbank läuft. Im Rahmen des thermischen Monitorings der Demonstrationsfassade ist geplant, den Temperaturverlauf in zwei Fassadenelementen zu erfassen. Hierzu wurde die Messung von Oberflächentemperaturen an Vorder- und Rückseite des Dämmstoffs sowie an der Rückseite der Fassadenpaneele vorbereitet. Das elektrische Monitoring, das vom ZAE Bayern geplant wird, wird die elektrische Bilanzierung der stromerzeugenden Fassade ermöglichen.



Abbildung 43: Raumsensor (montiert an der Holzleiste)



Abbildung 44: Integration Wärmemengenzähler und Heizungsstellantrieb



Abbildung 45: Raspberry Pi (installiert im Sicherungskasten)



Abbildung 46: Stromzähler (installiert im Sicherungskasten)

#### 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 und Prof. Dr. W. Krömer

##### Zielsetzungen

Die Reduktion von klimaschädlichen Treibhausgasen ist eine wesentliche Maßnahme, um den Folgen der drohenden Klimakatastrophe 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 47).

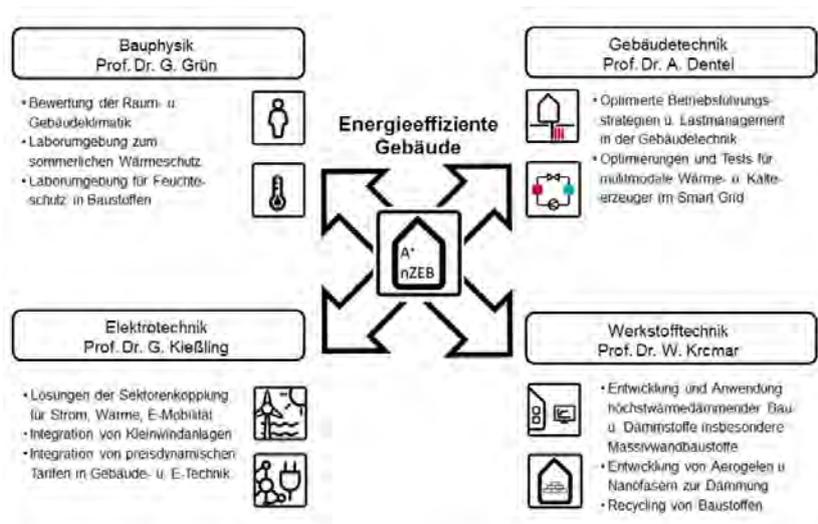
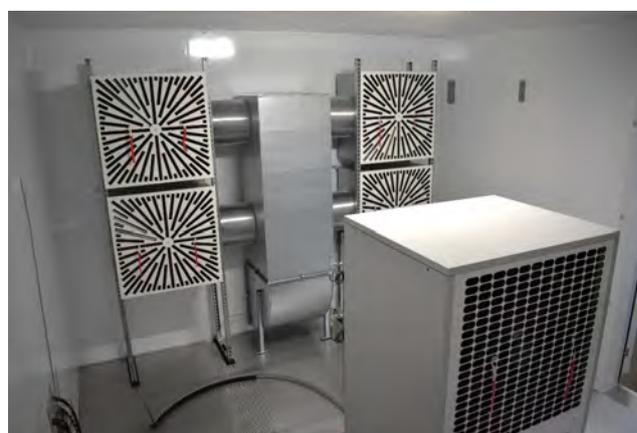


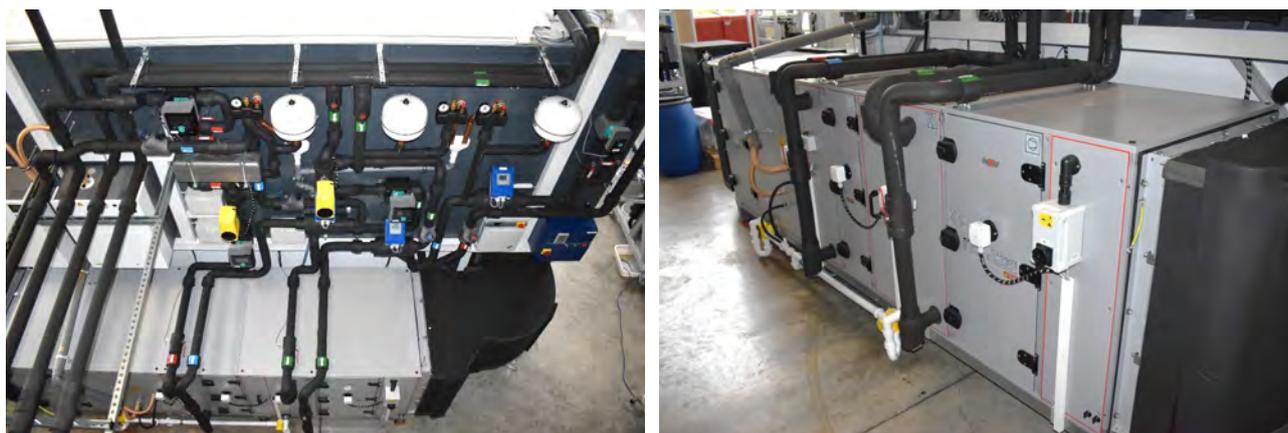
Abbildung 47: Forscherteam und inhaltliche Themen des Forschungsschwerpunkts Energieeffiziente Gebäude.

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 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.-Ing. A. Dentel) widmet sich daher verstärkt der ganzheitlichen Systemuntersuchung und -integration unterschiedlicher Wärmepumpentypen.

### Klimakammer

Im Rahmen der Programmsäule „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ wird ein bestehender Wärmepumpenprüfstand im THN-Technikum in Rednitzhembach um eine Klimakammer erweitert. Mit dieser soll die Emulation beliebiger Außenklimata innerhalb des 60 m<sup>3</sup> 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 Hardware-in-the-Loop-Konzeptes 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 °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 48: Die Klimakammer im THN-Technikum in Rednitzhembach.*

Der Aufbau der Klimakammer begann im Juli 2020 mit der Errichtung der eigentlichen Tiefkühlzelle (siehe Abbildung 48 l.o.). Danach folgten die Komponenten der Luftrekonditionierungsanlage (Klimagerät, Lüftungskanäle, Drallluftauslässe), welche sukzessive an die Kammer angebracht wurden. Durch die Anordnung der Luftauslässe innerhalb der Kammer soll eine möglichst homogene Vermischung der Luft bei gleichzeitig niedriger Strömungsgeschwindigkeit gewährleistet werden (siehe Abbildung 48 r.o.). Die Hydraulikkomponenten zur Regelung des Luftherhitzers und des Luftkühlers (siehe Abbildung 48 l.u. und r.u.) sind auf einer hinter der Klimakammer befindlichen Montagewand installiert und an die vorhandene Kälte- sowie Wärmeschiene des Technikums angeschlossen worden. In zwei getrennten Beimischschaltungen mit den dazugehörigen Stellventilen kann die der Umluft zugeführte Kälte- bzw. Wärmeleistung des Klimagerätes geregelt werden. Eine Kaskade aus zwei Widerstands-Dampfluftbefeuchtern führt der Umluft Wasserdampf zu, um der Entfeuchtung des Wärmepumpenprüflings (siehe Abbildung 48 r.u.) entgegenzuwirken. Mit einer kombinierten maximalen Befeuchtungsleistung von 20 kg Dampf je Stunde und einem sehr guten Regelungsvermögen im Kleinlastbereich bis 0,5 kg je Stunde kann eine sensible Regelung der relativen Luftfeuchtigkeit garantiert werden. Mit der Anbringungen der Wärmeisolierung an allen neu installierten Rohrleitungen und Hydraulikkomponenten im Mai 2021 wurde der Aufbau abgeschlossen.

In einer ersten Versuchsreihe konnten bereits die Betriebsgrenzen der Klimakammer ermittelt werden, welche die angestrebten Anforderungen an den Temperatur- sowie relativen Feuchtigkeitsbereich bestätigen. Ebenso stellte sich das Konzept der vier Drallluftauslässe zur Homogenisierung der Umluft als funktional heraus. So können bei maximaler Ventilator Drehzahl Strömungsgeschwindigkeit vor dem Wärmepumpenprüfling deutlich unterhalb der in der Norm geforderten Maximalgeschwindigkeit und über die gesamte Fläche der Klimakammer eine homogene Temperaturverteilung gemessen werden. Voraussichtlich zu Beginn des 1. Quartals 2022 sollen reguläre Wärmepumpen- oder Systemprüfungen durchgeführt werden.

### **Smart Energy Bench**

Der bestehende Wärmepumpenprüfstand im THN-Technikum in Rednitzhembach wurde im Rahmen einer Vorlauforschung und im Zuge der Erweiterung durch die Klimakammer zu einem eigenständigen und anspruchsvollen Prüfstandsystem für smarte Energiesysteme ("Smart Energy Bench") transformiert. Aus dem Zusammenspiel zwischen elektrischen und thermischen Energieerzeugern und Energiespeichern können vollständige Gebäudeenergiekonzepte samt intelligenter Regelung in einem flexiblen Hardware-in-the-Loop-Framework (siehe Abbildung 49) bereits im Labor wissenschaftlich untersucht und bewertet werden.

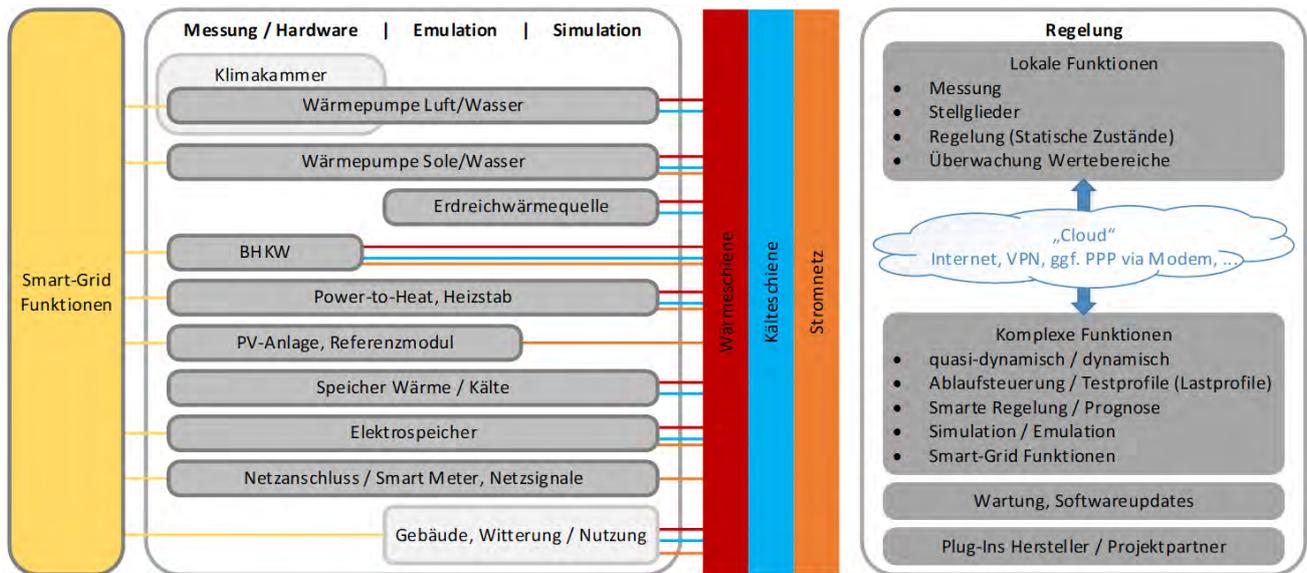


Abbildung 49: Funktionsschema des Smart Energy Prüfstands. Komponenten, Systembereiche und Regelungsfunktionen.

Zwar steht das System als Gesamtverbund im Fokus des Umbaus, der Neustrukturierung und laufender Forschungsanträge, jedoch wird weiterhin die Möglichkeit zur Durchführung von Einzelkomponententests gewährleistet bleiben, wie zum Beispiel von Wärmepumpenleistungsmessungen oder von Batteriespeichertests. Dazu wird das aus vorigen und parallel laufenden Projekten erlangte Know-how intensiv zur Umstrukturierung genutzt. Die vorhandene Hardware wird um zusätzliche Systemkomponenten erweitert, sodass zum Beispiel eine standortübergreifende Anlagenregelung durch eine Fernverbindung („Cloudbetrieb“) möglich wird. Die bestehenden Funktionen für die Ablaufsteuerung und Anlagenregelung sollen weiterhin strukturiert und erweitert werden.

- **Batteriespeichersystem:** Der Prüfstand wird um ein hochwertiges Batteriespeichersystem ergänzt, und erhält damit eine wesentliche Komponente eines energie- und lastflexiblen Systems (siehe Abbildung 49 links). Das Batteriesystem ist AC-gekoppelt. Die Regelung des Batteriespeichersystem (im Kontext PV-Direktverbrauch und Lastglättung) wird auf Basis einer (virtuellen) großen PV-Anlage erfolgen. Das Batteriespeichersystem wurde auf ca. 10 kWh Speicherkapazität und ca. 5 kW Nennleistung dimensioniert, passend zur bestehenden Wärmepumpe und dem Mikro-Blockheizkraftwerk. Es wurde ein 3-phasiges System gewählt, welches zudem weitgehend flexibel in der Lade-/Entladeleistung steuerbar ist. Dadurch wird ein Energiemanagementsystem auf Basis der Prüfstands-Regelung ermöglicht, unabhängig von der internen Regelung des Herstellers. Durch die explizite Steuerbarkeit des Systems kann z.B. die effektive Speichergröße herabgesetzt werden. Ebenfalls können verzögerte Regelungsantworten auf veränderliche Lasten emuliert werden. Zusätzlich kann die künstliche Beschränkung auf eine Phase realisiert werden.
- **Mini-PV-Anlage:** Auf dem Gebäudedach des Technikums ist eine kleine PV-Anlage installiert (siehe Abbildung 49 rechts). Sie dient als Referenz zur Hochrechnung der Leistung einer virtuellen größeren Anlage von z.B. 10 kW Nennleistung. Der Skalierungsfaktor kann je nach Aufgabenstellung der Systemuntersuchung variiert werden. Aufgrund baulicher und rechtlicher Einschränkungen musste auf den Bau einer größeren PV Anlage verzichtet werden. Die kleine PV-Anlage besteht aus zwei Modulen, einem Modulwechselrichter (AC-Kopplung) und integrierter Datentechnik mit Leitungsmessung. Sie hat somit alle wesentlichen Features einer großen PV-Anlage und erlaubt entsprechende Untersuchungen. Parallel kann neben dem Prüfstand eine kleine PV-Anlage als Exponat genutzt werden. Hier können mit künstlicher Beleuchtung und Verschattungselementen anschaulich veränderliche PV-Erträge simuliert werden. Beide PV Anlagen werden (mittelbar) durch die Messwerterfassung des Prüfstands ausgewertet. Die Systemregelung reagiert auf der Ebene der „Smarten Funktionen“ auf die veränderliche PV-Leistung z.B. durch (De-)Aktivierung der Wärmepumpe oder Be-/Entladen des Batteriespeichers. Die Anlage auf dem Dach wird unabhängig vom Prüfstand permanent betrieben, die Daten werden von einem unabhängigen (aber mit dem Prüfstand gekoppelten) Datensystem aufgezeichnet.



Abbildung 50: Smart Energy Bench, bestehend aus Mikro-Blockheizkraftwerk, Batteriespeicher, Sole/Wasser-Wärmepumpe und Steuerungsrechner (links) sowie Mini-PV-Anlage und Wetterstation auf dem Dach des Technikums (rechts).

- Erweiterung der Messtechnik: Speziell für zukünftige Anwendungen im Bereich einer normgerechten Einzelkomponentenprüfung sind Sensoren im Bereich des Wärmepumpenprüflings durch hochwertige ersetzt worden, um die in der Norm (z. B. DIN EN 14511) geforderten Messgenauigkeiten zu erreichen. Zusätzlich wurden Messstellen neu installiert, um eine detailliertere thermische Bilanzierung des Heizungssystems zu ermöglichen. Zu nennen sind hier die Installation von hochwertigen magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten zur Bilanzierung der Wärmepumpenheizleistung. Über eine auf dem Dach des Technikums angebrachte Wetterstation, können im Bedarf die Daten (Einstrahlung, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) live zur Simulation des emulierten Gebäudes herangezogen werden. Wesentliche neue Komponenten sind die modularen Messwerterfassungssysteme, bestehend aus je einem Hauptgerät und drei Einschubkarten mit jeweils 10 bzw. 20 Messkanälen (2- oder 4-poliger Messtyp). Die Geräte ermöglichen eine modulare Gliederung von Anlagenbereichen und einer schrittweisen Erweiterung bzw. Umstellung der Anlagensensorik.
- Hydraulische Umbauten: Zur Flexibilisierung der bis dato starren Anlagenhydraulik wurden zum einen die Einbauposition der Sole/Wasser-Wärmepumpe dahingehend abgeändert, dass ein einfacher Austausch des Prüflings durchgeführt werden kann. Zum anderen wurden diverse Bypässe an den thermischen Speichern und innerhalb der Anlagenhydraulik installiert, sodass bei Bedarf die Anlagencharakteristik geändert werden kann. So wäre der eingebaute Heizungspufferspeicher nun auch als "Pendelladespeicher" (bisher als "hydraulische Weiche") integrierbar oder komplett aus dem System "abschaltbar".
- Systemprüfung mit repräsentativen Prüfzyklen: Eine Systembewertung wird in der Regel durch sogenannte Einzelkomponentenprüfungen durchgeführt, bei welchen jede Systemkomponente ihren jeweiligen Normprüfverfahren unterzogen wird, wie zum Beispiel DIN EN 14511 zur Ermittlung der Wärmepumpenheizleistung. Dies geschieht meist unter stationären Prüfbedingungen. Jedoch kann die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Wärmeerzeugern innerhalb eines Heizungssystem unter instationären Bedingungen und im Teillastbereich stark von den Angaben im Datenblatt (stationäre Prüfungen) abweichen. Wünschenswert ist daher ein Systemprüfverfahren, welches innerhalb einer Kurzzeitmessphase die Leistungsfähigkeit eines Wärmepumpenheizsystems im Labor bestimmen kann. Innerhalb einer studentischen Arbeit wurden hierzu die Methodik zur Ermittlung dieser Prüfzyklen entwickelt und im Prüfstand integriert. Es wurden erste Messungen anhand repräsentativer Prüfzyklen durchgeführt, welche innerhalb der nur 6-tägigen Messphase eine Bewertung der Jahreseffizienz (z.B. die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe) zulässt.

### 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) startete im 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 und mit den weiteren Projektpartnern Trevisto AG, Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen (ISS) sowie 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“.

In der Projektphase des Jahres 2021 erfolgte die weitere Installation von stationären Sensoren beim Demonstrationspartner. Die bereits vorhandenen Messwerte wurden analysiert. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Fehlererkennung und –diagnose im Anlagenbetrieb. Die konkreten Anwendungsfälle waren Effizienz der Druckluftherzeugung, Druckluftleckage und Wärmerückgewinnung bei der Warmwasserbereitung. Die Aufzeichnung der Sensordaten erfolgt analog der bisher installierten Sensorik über das Datenaufzeichnungssystem OGEMA. OGEMA (Open Gateway Energy Management) ist ein von drei Fraunhofer Instituten entwickeltes und durch das BMWi gefördertes Projekt. Über dieses System werden die erfassten Daten an den Data Lake mittels OPC-UA Datenstandard weitergegeben. Eine Optimierung des Datentransfers zwischen dem Sensornetzwerk und dem Data Lake wurde begonnen. Aktuell werden die Schritte unternommen, um die geplanten Use Cases beim Demo-Partner umzusetzen.

Für die weitere Bearbeitung von Anwendungsfällen wird in Kooperation mit Prof. Lauterbach (Fak. AMP) ein neues MIOTY-Funksensorsystem getestet und noch im Jahr 2021 beim Demonstrationspartner getestet. Weiterhin werden Ersatzmessgrößen für die kostengünstigen Sensoren von Maschinen untersucht, um daraus den Energieverbrauch von Maschinen zu berechnen.

Sowohl die Projektpartner als auch Projektträger/Fördermittelgeber zeigen Interesse an einer Fortsetzung über den bestehenden Projektrahmen hinaus. Daher wird aktuell die Förderung eines Anschlussprojekts beantragt.

### **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 stationäre Datenerfassung erfolgte eine detaillierte Planung und Konzeption der Messinfrastruktur. Potentielle Sensoren und relevante Komponenten, die auf dem Markt verfügbar sind, wurden recherchiert.

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 kommt das o.g. OGEMA System zum Einsatz. Die Umsetzung des Edge Computing Konzepts erfolgt durch den Projektpartner Fraunhofer IIS, die Realisierung des Messkoffers erfolgt durch die THN.

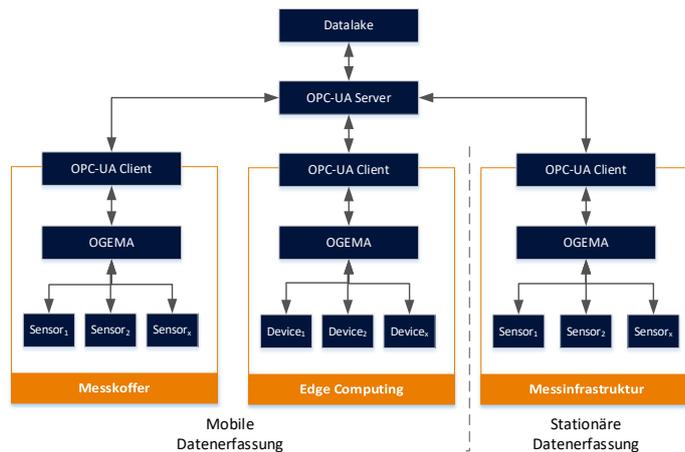


Abbildung 51: Konzept für die Kommunikationsinfrastruktur (links). Nachgerüstete Messtechnik, als Schaltschrankmodule in hoher Montagedichte mit digitaler Anbindung, WAGO Systembus mit zentralem Controller (rechts).

### Umsetzung der Datenerfassung beim Praxispartner MC-Tech Metallbau GmbH

Die beim Praxispartner 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 würde zusätzliche Messinfrastruktur installiert. Alle wesentlichen elektrischen Verbraucher (hauptsächlich Werkzeugmaschinen) sowie die thermische Energie für die Gebäudeheizung und produktionsunterstützende Prozesse wie die Druckluftherzeugung 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.

### 1.3 Herzo Base Energiespeicherhäuser - ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen; Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. A. Dentel, Prof. Dr. G. Kießling, M.Eng. C. Betzold, M.Eng. K. Koutrouveli, M.Eng. C. Dettelbacher, M.Eng. M. Braun, M.Eng. F. Kugler, M.Eng. D. Sappa und Prof. Dr. W. Krcmar

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

##### Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird unter anderem der Einsatz von CALOSTAT als neuartiges Hochleistungs-Dämmmaterial zur wärmetechnischen Optimierung von Gebäudehüllen untersucht. Dazu wurde ein achtspänniger Reihenhaus-Komplex in moderner Ziegel-Massivbauweise ausgeführt, wobei vier der acht Häuser entsprechend dem Stand der Technik mit perlitgefüllten Hochlochziegeln in den Wandstärken 42,5 cm bzw. 36,5 cm erstellt wurden. Diese dienen hierbei als Vergleichshäuser zu den weiteren vier Wohneinheiten, deren Wandaufbau zweischalig mit perlitgefüllten Hochlochziegeln in der Wandstärke 30 cm sowie mit zusätzlich 12 cm starken CALOSTAT-verfüllten

Vorsatzziegeln erfolgte (Abbildung 52, Abbildung 53). Das Wärmedämmkonzept sieht außerdem u.a. unterschiedliche Innen- und Außenputze der einzelnen Häuser vor. Um die verschiedenen Wandbaukonzepte miteinander vergleichen und energetisch bewerten zu können, wurden die acht Wohneinheiten so angeordnet, dass eine gedachte Spiegelachse in die Mitte der Häuserzeile zwischen Haus 4 und Haus 5 gelegt werden kann. Abbildung 52 zeigt die unterschiedlichen Wandaufbauten der acht Reihenhäuser und die theoretisch vorhergesagten U-Werte.

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 $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$							
Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$	Armierungs- spachtel mit Gewebe Maxit Multi 262 $\lambda = 0,82 \text{ W/mK}$
Wärme- dämmputz therm 76, $\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Superfaser- Leichtunterputz IP 190 SFL $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$	Wärme- dämmputz therm 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 42,5 cm $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F 42,5 cm $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F 36,5 cm $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 36,5 cm $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 36,5 cm $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F 30 cm $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Kalk-Gips Innenputz IP 23 F 30 cm $\lambda = 0,27 \text{ W/mK}$	Innenputz pluscalc 381 30 cm $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$
Solance	Silikatfarbe	Solance	Silikatfarbe	Silikatfarbe	Solance	Silikatfarbe	Solance
$U = 0,152$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,155$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,179$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,178$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,132$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,132$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,132$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,130$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

Abbildung 52: Wandaufbauten der acht Reihenhäuser und die theoretisch vorhergesagten U-Werte

Das neuartige Konzept des Wandaufbaus mit der Integration von CALOSTAT ( $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,019 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) als Hochleistungs-Dämmstoff in das Innere einer Ziegelschale ermöglicht eine bedeutende Absenkung der berechneten U-Werte auf  $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , was einer Verbesserung der Wärmedämmung um bis zu 30 % entspricht. Dadurch können Heizwärmeverluste in der Gebäudehülle und entsprechend der Heizwärmebedarf in kalten Monaten massiv gesenkt werden.

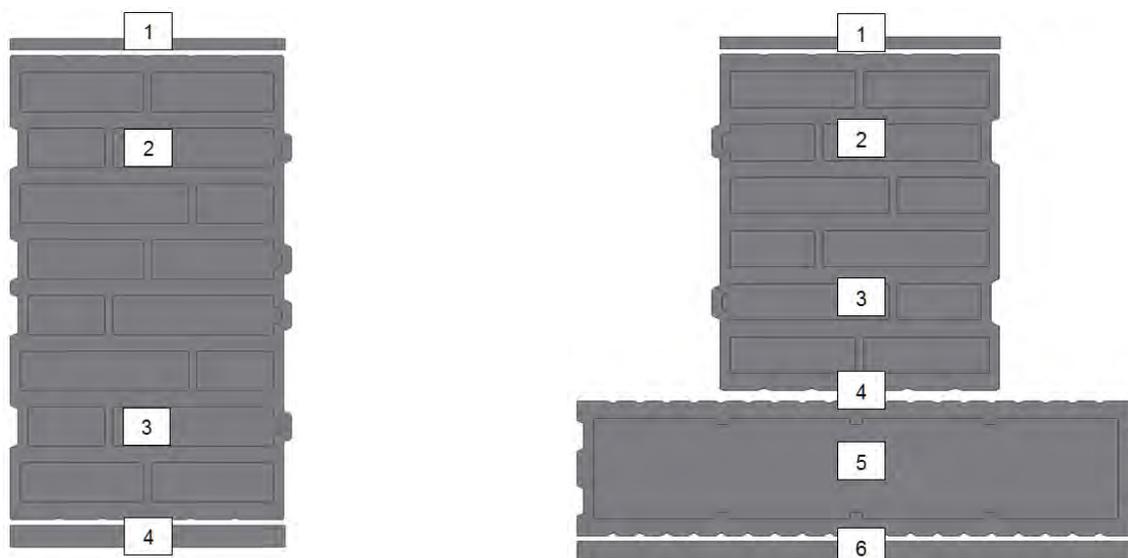


Abbildung 53: CALOSTAT-gefüllter WDF 12 Ausgleichsziegel (Links). Zweischalige Bauweise mit 30 cm dicken Perlit-gefüllten Mauerziegeln und 12 cm dicken CALOSTAT-gefüllten WDF 12 Vorsatzziegeln (Mitte). Zweischalige Bauweise im Eckbereich des Erdgeschosses (Rechts)

## Monitoring der Wandbaustoffe

Zur Bewertung des energetischen Verhaltens der Gebäudehüllen wurden an 30 Messstellen insgesamt 248 Wärme-, Temperatur-, rel. Luftfeuchte- und Materialfeuchte-Sensoren in die Dämmschichten, Ziegelzwischenräume und in die Putzschichten eingebaut (Abbildung 54). Mit Hilfe der Sensoren kann das wärme- und feuchtetechnische Verhalten des Mauerwerks sowie die Bereiche der Wärmebrücken ganzjährig aufgezeichnet und bewertet werden. Die daraus gewonnenen Daten ermöglichen den wärmetechnischen Vergleich der Gebäudehüllen der einschaligen Bauweise (Perlit-verfüllte Mauerziegel gemäß dem Stand der Technik, Häuser 5-8) mit der neuartigen, zweischaligen Wandkombination aus perlitgefüllten Mauerwerksziegeln mit zusätzlich angebaute CALOSTAT®-gefüllter Vorsatzschale (Häuser 1-4). Darüber hinaus wird der Einfluss der vor Ort herrschenden klimatischen Bedingungen auf das

Langzeitverhalten der Wandaufbauten ermittelt. Hierbei kommen abhängig vom Wandaufbau zwei verschiedene Einbau-Anordnungen der Sensoren zum Einsatz. Abbildung 54 zeigt die Anordnung der Sensoren in der einschaligen bzw. in der zweischaligen Bauweise der Gebäudehüllen.



1. Innenputzschicht: Thermoelement und Wärmestromsensor in Putzschicht
2. 2. Perlitreihe von Innen (Hochlochziegel): Thermoelement und Feuchtesensor
3. 2. Perlitreihe von Außen (Hochlochziegel): Thermoelement und Feuchtesensor
4. Außenseite Hochlochziegel: Thermoelement und Wärmestromsensor
5. CALOSTAT-Dämmung: Thermoelement und Feuchtesensor
6. Außenseite CALOSTAT-Wärmedämmfassade: Thermoelement und Wärmestromsensor in Putzschicht

Abbildung 54: Sensor-Schema in den Ziegeln für Standard-Messungen in den CALOSTAT-Häusern 1-4 (Rechts) sowie den Vergleichshäusern 5-8 (Links)

## Ergebnisse

### Auswertung des Baustoff-Monitorings

Die Auswertung der Sensor-Messdaten des Baustoff-Monitorings erfolgt kontinuierlich. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die U-Werte der Wände gelegt. Schwierigkeiten ergaben sich aus den zu milden Witterungsbedingungen, da für aussagekräftige U-Werte eine Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen von mindestens 5 °C über 72 Stunden erforderlich ist. Die resultierenden U-Werte der Wände der Häuser werden mit nachfolgender Formel berechnet:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$$

q = Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]

T<sub>i</sub> = Temperatur Innen-Putz (T1-Sensor)

T<sub>e</sub> = Temperatur Außen-Putz (T4 bzw. T6)

Die theoretisch berechneten U-Sollwerte und die real gemessenen U-Werte der Gebäudehüllen werden in Tabelle 5 und Abbildung 55 vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der berechneten U-Sollwerte und gemessenen U-Werte der Gebäudehüllen [W/m<sup>2</sup>K]

U-Werte	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4	Haus 5	Haus 6	Haus 7	Haus 8
Berechnet:	0,1303	0,1324	0,1324	0,1320	0,1780	0,1790	0,1552	0,1523
Gemessen:	0,1399	0,1113	0,1177	0,1197	0,1741	0,2606	0,1266	0,1248

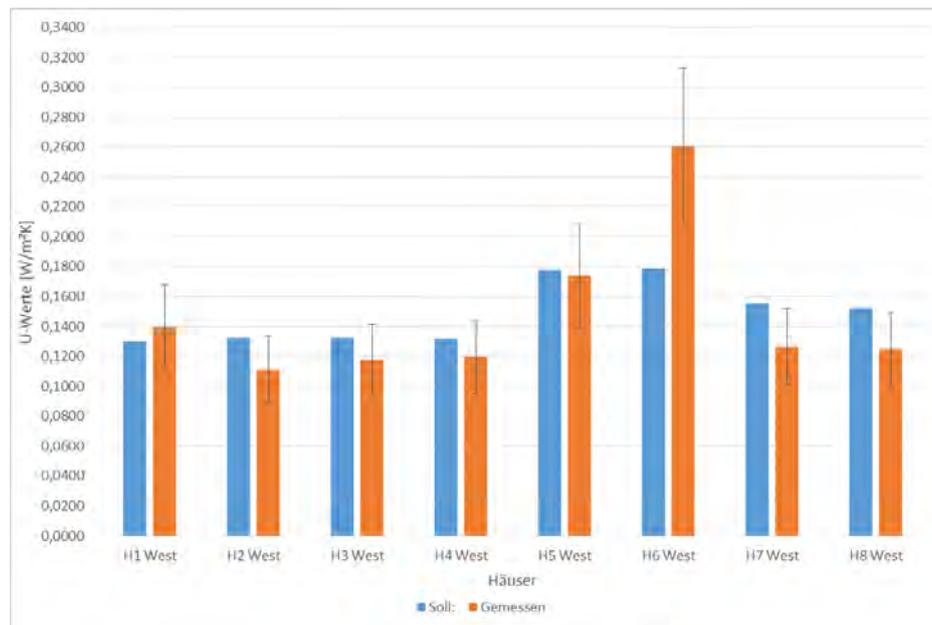


Abbildung 55: Gegenüberstellung der berechneten U-Sollwerte (Blau) und der gemessenen U-Werte (Orange), der 8 Forschungshäuser

Aus der Gegenüberstellung geht hervor, dass die gemessenen U-Werte unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit von 20 % im Bereich der vorhergesagten U-Sollwerte liegen. Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen U-Werte bei 5 der 8 Häuser die Soll-Werte unterschreiten und lediglich bei 3 Häusern darüber liegen. Abgesehen von Haus 6 liegen alle gemessenen U-Werte innerhalb der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit von 20 %. Die ermittelten U-Werte bilden auch die Trends der wärmetechnischen Erwartungen an die Gebäudehüllen ab: Die CALOSTAT-Häuser (Häuser 1 bis 4) weisen die niedrigsten U-Werte und damit die besten Wärmedämmeigenschaften aller acht Häuser auf. Die Häuser 5 bis 8 (Standard-Bauweise) weisen höhere U-Werte als die CALOSTAT-Häuser auf, entsprechen jedoch bezüglich der Wärmedämmung dem aktuellen Stand der Technik für hochwärmedämmende Gebäudehüllen. Beim wärmetechnischen Vergleich der Standard-Häuser schneiden Haus 5 und Haus 6 infolge der Wandstärken von nur 36,5 cm am schlechtesten ab, während Haus 7 und 8 infolge der Wandstärken von 42,5 cm deutlich besser gedämmt sind, aber im Vergleich zu den CALOSTAT-Häusern trotzdem höhere U-Werte besitzen. Als Gründe für die Abweichungen der gemessenen U-Werte von den U-Sollwerten der Wandaufbauten kommen in Frage:

1. Mögliche Abweichung der Messgenauigkeit der Wärmestrom-Sensoren von bis zu 20 %
2. Vorliegen von Konvektion im Wandaufbau; Luftströmungen innerhalb der Wände
3. Solare Gewinne durch das Aufheizen des Außenputzes infolge Sonneneinstrahlung
4. Rapide Temperaturwechsel Tag/Nacht beispielsweise im Sommer
5. In den Wänden vorliegende, noch nicht ausdiffundierte Baufeuchte
6. Ursprüngliche theoretische Berechnung der U-Sollwerte zu niedrig, da von idealen physikalischen Randparametern ausgegangen wurde

Es besteht die Möglichkeit, dass insbesondere Punkt 5 während des Langzeitmonitorings zum Tragen kommt, da angenommen werden kann, dass während der Bauphase in alle Wände der Versuchshäuser gleichermaßen Feuchtigkeit eingebaut wurde, wodurch sich die Dichte der Wandbaustoffe erhöht und folglich die Wärmeleitfähigkeit der

Gebäudehülle steigt. Sollte dies der Fall sein, ist zu erwarten, dass sich die U-Werte der Häuser im Laufe der Zeit noch weiter absenken werden. Auch das Langzeit-Monitoring der Wandbaustoffe wird kontinuierlich fortgeführt. Da sich die Ergebnisse des Monitorings für die Häuser gleicher Bauweise kaum unterscheiden wird im Folgenden lediglich eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der verschiedenen Bauweisen (einschalig/zweischalig) dargestellt. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturverläufe in den Wänden von Haus 4, exemplarisch für die zweischalige Bauweise mit CALOSTAT-gefüllten Vorsatzziegeln sowie von Haus 5, exemplarisch für die einschalige Standard-Bauweise mit perlitgefüllten Poroton-Hochlochziegeln, dargestellt. Die Abbildung 56 und Abbildung 57 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 Raumtemperatur, 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-Aufspaltung während der kalten Monate. Im Frühjahr und im Herbst zeigen sich sukzessive Temperatur-Übergänge zwischen beiden Extremen. Vergleicht man die Temperaturen der in den Innenputz verbauten Sensoren T1 (rot) der beiden Bauweisen, so treten zwei Unterschiede der verschiedenen Bauweisen zu Tage.

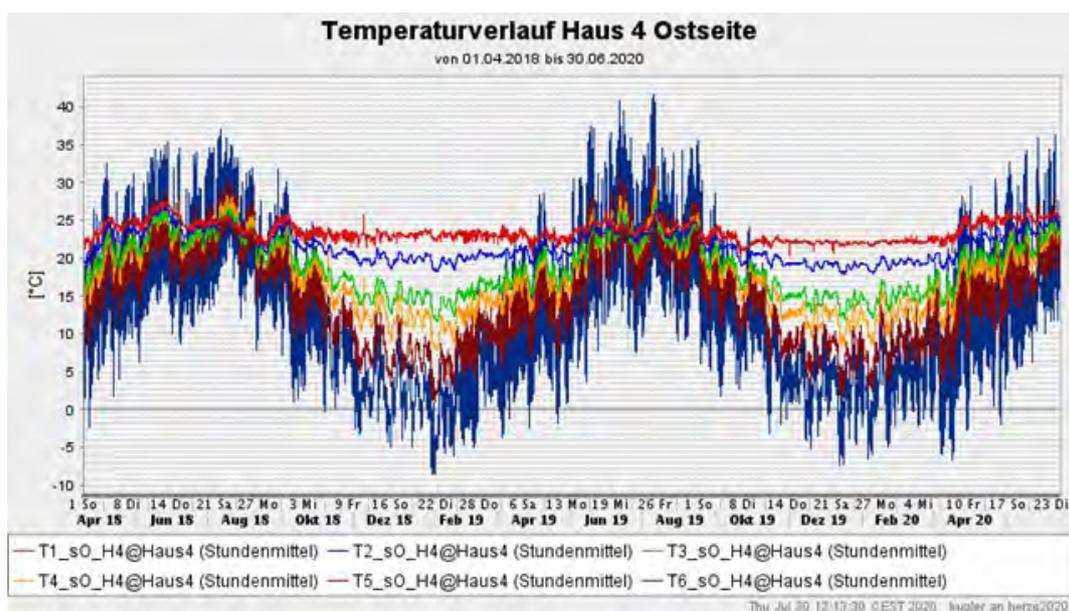


Abbildung 56: Temperaturverläufe in der Ost-Wand des Reihemittelhauses 4 (zweischalige Bauweise) über zwei Jahre und zwei Monate von Anfang April 2018 bis Ende Juni 2020

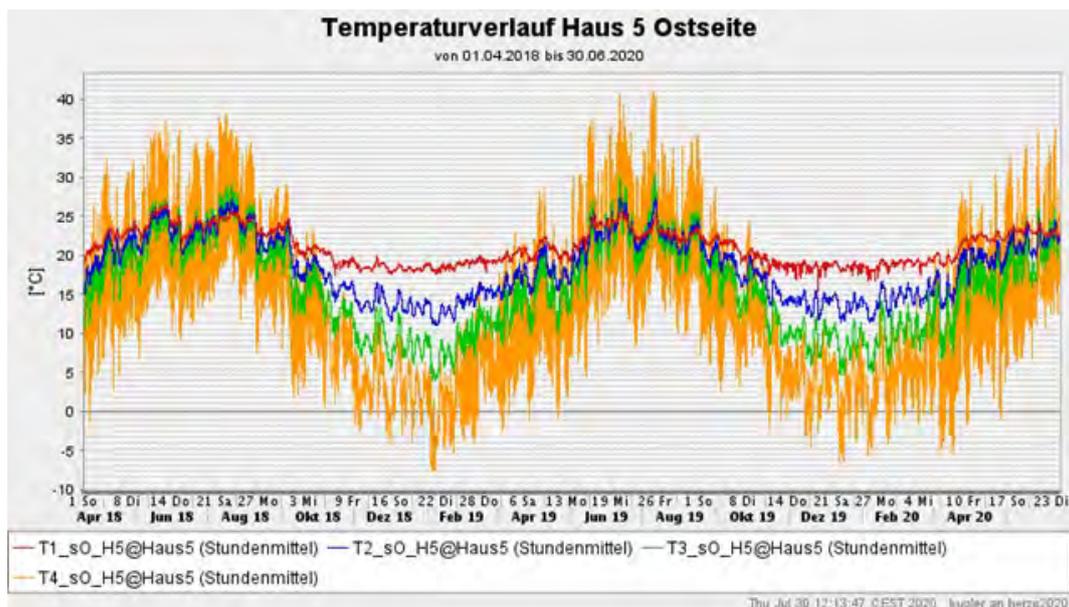


Abbildung 57: Temperaturverläufe in der Ost-Wand des Reihemittelhauses 5 (einschalige Bauweise) über zwei Jahre und zwei Monate von Anfang April 2018 bis Ende Juni 2020

Zum einen schwanken die Temperaturen im Innenputz der einschaligen Bauweise Haus 5 (Abbildung 57) über einen Tag stärker, als dies bei der zweischaligen Bauweise Haus 4 (Abbildung 56) der Fall ist. Zum anderen ist zu erkennen, dass in den Wintermonaten die Temperaturen auf der Innenseite des Hauses 5 (Abbildung 57) der einschaligen Bauweise, stärker durch die Witterungsbedingungen beeinflusst werden, als dies bei der zweischaligen Bauweise Haus 4 (Abbildung 56) der Fall ist. Dieser Sachverhalt tritt durch die niedrigeren Wandtemperaturen der einschaligen Bauweise während der Wintermonate zu Tage. Diese beiden Beobachtungen sind auf die durch das CALOSTAT deutlich erhöhte Dämmwirkung der Außenwände der Gebäude mit zweischaliger Bauweise zurückzuführen.

### Übertragung der Messergebnisse auf andere Wandsysteme

Um die Messergebnisse dieses Forschungsvorhabens auf andere Wandsysteme übertragen zu können, wurde eine ausführliche Literaturrecherche und darauf aufbauende, wärmetechnische Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden Bauten der 1950er, 1970er und 1980er Jahre sowie weitere Bestandsgebäude mit Vorhangfassade und verschiedene Arten von Neubauten (KS-Häuser, Wandkonstruktionen mit Natursteinfassade) untersucht. Darüber hinaus fanden weiterführende Berechnungen bezüglich der wärmetechnischen Sanierung von Steildächern statt. Hierbei wurden jeweils die U-Werte der betreffenden Gebäude-Typen berechnet und mit gemessenen U-Werten bei CALOSTAT-Anwendung verglichen. Häufigste Mängel eines Wohnhauses sind mit Erstellungsdatum 1950 anzutreffen [1].

### Nachkriegsbauten der 1950er Jahre

Im Zuge des Wiederaufbaus der Städte nach dem 2. Weltkrieg entstanden schnell zu errichtende innerstädtische Häuser-Blocks. Typisch für die errichteten Bauten sind dünne Außenwände mit schlechten Wärme- und Schallschutzeigenschaften. Außerdem wurde üblicherweise auf eine Wärmedämmung der obersten Decke des Wohnhauses verzichtet [1]. Abbildung 58 zeigt die häufigsten Mängel eines im Jahr 1950 erstellten Wohnhauses.

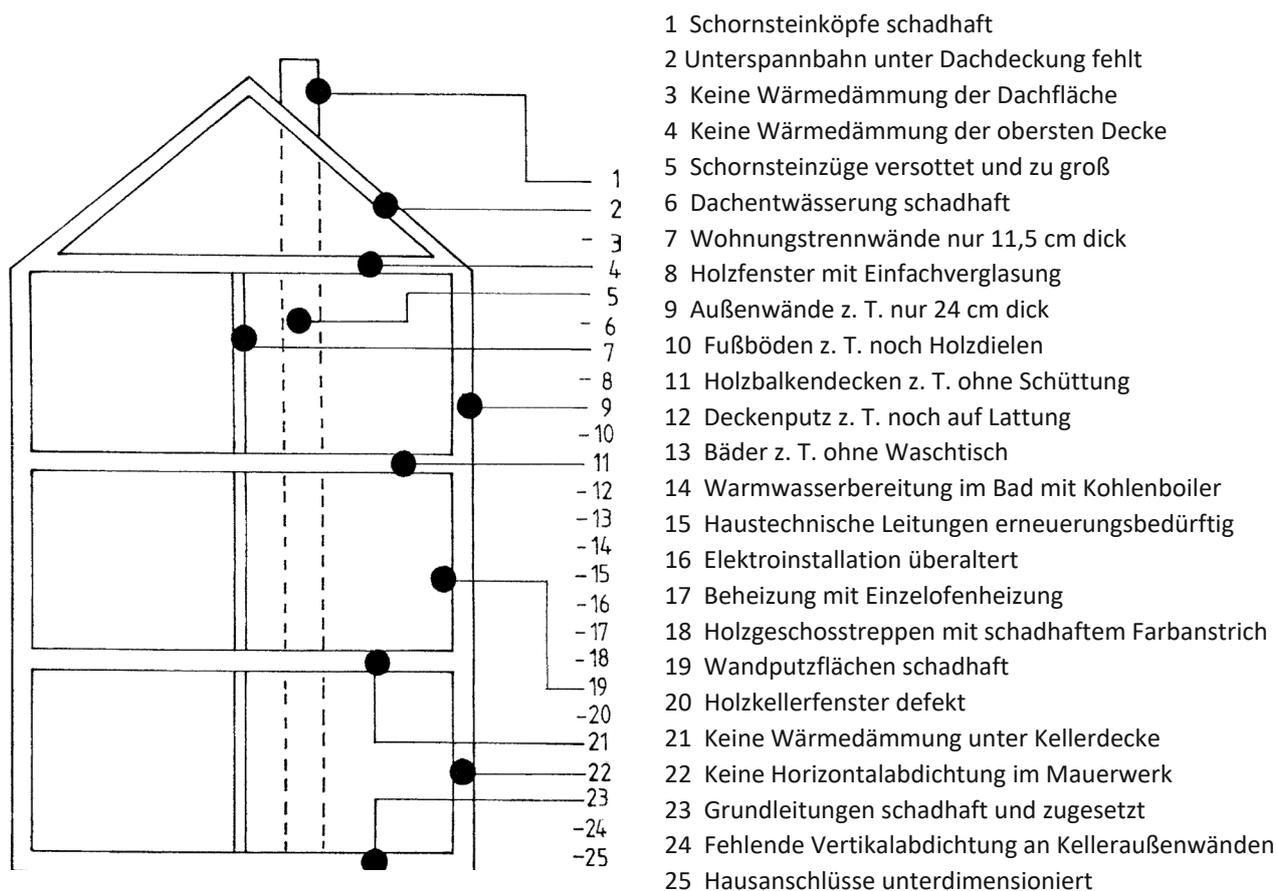


Abbildung 58: Häufigste Mängel eines Wohnhauses mit Erstellungsdatum 1950 [1]

Eine Sanierung von Bestandsfassaden unter Einsatz von CALOSTAT-befüllten Vorsatzschalen würde die Wärmedämmung solcher Altbauten erheblich verbessern. Sollte der Einsatz von Vorsatzschalen aus Denkmalschutzgründen nicht realisierbar sein, kann alternativ auch eine Innendämmung mit CALOSTAT Pure angebracht werden. Die Vorteile einer solchen Innendämmung sind neben einer einfachen und kostengünstigen Anbringung, die Möglichkeit des schnellen Aufheizens eines von Innen gedämmten Raums, da hier die massiven Außenwände nicht mit aufgeheizt werden müssen. Wie in Abbildung 58 zu erkennen, verfügen Nachkriegsbauten der 1950er Jahre üblicherweise über eine ungedämmte oberste Decke. Dies führt zu sehr hohen Wärmeverlusten, vor allem in den Wintermonaten, die durch eine Dämmung mit CALOSTAT auf ein Minimum abgesenkt werden können. Folglich lassen sich nicht nur die Messergebnisse dieses Forschungsvorhabens gut auf dieses Wandsystem übertragen, sondern auch eine reale Übertragung des Baukonzepts als Sanierungsoption wäre denkbar. Dabei ist auf Grund der schlechten U-Werte dieses Gebäudetypus ein entsprechend hohes Verbesserungspotential gegeben.

#### Plattenbauten der 1970er Jahre

Durch die über Jahre hinweg günstigen Ölpreise, wurde eine energieeffiziente Fassadenentwicklung bis zu den 70er Jahren praktisch nicht durchgeführt. Es wurden auch weiterhin dünne einschalige Wandaufbauten erstellt, da diese besonders kostengünstig und einfach zu errichten waren. Erst durch ansteigende Ölpreise wurden auf Basis der Wärmeschutzverordnung von 1977 Gebäude mit Styroporplatten verkleidet. Das Ziel bestand darin, den U-Wert in Abhängigkeit des Verhältnisses von Gebäudefläche zu Gebäudevolumen abzusenken. Die zur damaligen Zeit errichteten Häuser und Gebäude können aus heutiger Sicht energetisch weiter optimiert werden. Durch den Ersatz der verbauten Styroporplatten durch CALOSTAT oder dem Einsatz einer mit CALOSTAT befüllten Vorsatzschale ließen sich die U-Werte solcher Gebäude weiterhin drastisch verringern, was eine Absenkung der Wärmeverluste zur Folge hätte. Entsprechend ist eine Übertragung der Messergebnisse dieses Forschungsvorhabens auf drei Weisen denkbar:

1. Eine Verkleidung des ungedämmten Mauerwerks mittels CALOSTAT-gefüllter Vorsatzschalen
2. Ersetzen der seit 1977 angebrachten Styroporplatten durch CALOSTAT-gefüllte Vorsatzschalen

### 3. Anbringung von CALOSTAT-gefüllten Vorsatzschalen auf das bereits mit Styropor gedämmte Wandsystem



Abbildung 59: Plattenbau aus den 1970er Jahren [2]

#### Häuser der 1980er Jahre

Nach der in den 1970er Jahren neu gewachsenen Aufmerksamkeit für Energieeinsparung schritt die Forschung an Niedrigenergie- und Passivhäusern weiter voran. In den 80er Jahren etablierte sich eine mehrschalige Bauweise der Außenwände, wodurch die U-Werte deutlich abgesenkt wurden. Ein Richtwert für damals gängige U-Werte der Außenwände lag zwischen 0,3 – 0,5 W/(m<sup>2</sup>K) [3]. Während der Wärmedurchgang durch ebene Fassadenwände stark minimiert werden konnte, wurden Wärmebrücken in Rollladenkästen, Balkonverankerungen, Fenster- und Türstürzen noch nicht ausreichend verhindert. Auch die oberste Geschossdecke und die Kellerräume ließen durch unzureichende Dämmung noch hohe Wärmeverluste zu. Neben den wärmetechnischen Verbesserungen, wurden verbaute gesundheitsschädliche Stoffe wie z.B. Asbest ersetzt, die aufgrund ihrer Brandschutzeigenschaften eingesetzt wurden. Auch diese Wandsysteme bieten Möglichkeiten für eine Anwendung der hier erzielten Forschungsergebnisse und lassen ein sehr gutes Verbesserungspotential erwarten.



Abbildung 60: Typisches Haus aus den 80er Jahren mit den häufigsten Sanierungsproblemen [4]

#### Sanierung von Bestandsgebäuden mittels CALOSTAT®-modifizierter Vorhangfassade

Eine Sanierungsmöglichkeit zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Bestandsgebäuden stellt eine nachträgliche Verkleidung der Außenwand mit einer hinterlüfteten Vorhangfassade dar (Abbildung 61). Dazu wird auf die Außenwand des Mauersystems eine Wärmedämmschicht (z.B. Holzfaserdämmplatten, Mineraldämmplatten, EPS-

Platten) aufgebracht und anschließend das Holzkleid der Vorhangfassade auf eine Unterkonstruktion geschraubt. Zwischen Dämmmaterial und Holzkleid wird ein Luftspalt eingebracht, welcher die Aufgabe hat Wasserdampf, der durch die Wand diffundiert, abzuführen und sowohl Niederschlags-, als auch Oberflächenfeuchte auszutrocknen.

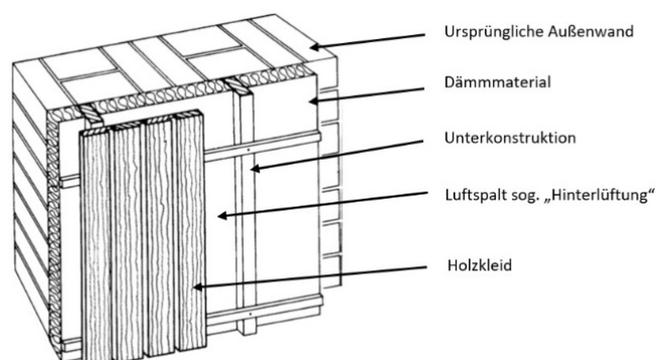


Abbildung 61: Wandaufbau mit hinterlüfteter Vorhangfassade 8 [1]

Der Einsatz von CALOSTAT® als neues Hochleistungs-Dämmmaterial würde sich hier gegenüber den bisher verwendeten Dämmmaterialien (wie z.B. Holzfaserdämmplatten) anbieten, wodurch eine deutliche Absenkung des U-Wertes der Wand zu erwarten wäre. Wärmetechnische Berechnungen bestätigen diese Annahme (Tabelle 7).



Abbildung 62: Wohnhaus vor und nach der Sanierung mit hinterlüfteter Vorhangfassade aus Holz [5]

### Anwendungsbeispiele für CALOSTAT® in Neubauprojekten - Wandkonstruktionen mit Natursteinfassade

Natursteine, die im Bauwesen eingesetzt werden, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer werkstofftechnischen Eigenschaften wie z.B. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Frostbeständigkeit, etc. Diese Materialeigenschaften sind ausschlaggebend für deren Einsatz in Wandkonstruktionen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeiten werden bei einer Massivbauweise aus Natursteinen - das heißt einer tragenden Vollmauer aus Naturwerksteinen - enorm hohe Wanddurchmesser nötig, um eine gute Wärmedämmung zu realisieren. Um diese extrem hohen Wanddurchmesser zu verhindern und um Kosten einzusparen, werden Natursteinfassaden heutzutage als Vormauerung ausgeführt. Hierbei tritt der Naturstein rein ästhetisch, also losgelöst von der tragenden Wand als reines Bekleidungsmaterial auf.

Der Aufbau der Außenwand stellt sich somit wie folgt dar:

- Natursteinplatten
- Hinterlüftungszone
- Wärmedämmschicht
- Tragende Wand

Mit dem Einsatz von CALOSTAT® als Wärmedämmschicht könnte ein deutlich geringerer Wanddurchmesser bei gleichbleibenden U-Werten realisiert werden. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit von CALOSTAT® gegenüber häufig eingesetzten Styroporplatten kann durch Halbierung der Schichtdicke dieselbe Dämmaufgabe geleistet werden.



Abbildung 63: Vorgehängte Steinfassaden aus grünem Dolomit (links) und gelbem Travertin (rechts) [6]

### Anwendungsbeispiele für CALOSTAT® in Neubauprojekten - Kalksandsteinhäuser

Der typische Wandaufbau von Mauerwerken aus Kalksandstein (KS) sowie der Vergleich der gängigen U-Werte der beschriebenen Wand-Systeme kann der folgenden Grafik entnommen werden.

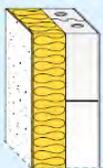
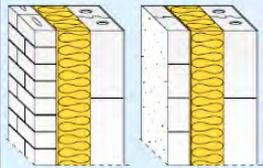
	Dicke des Systems [cm]	Dicke der Dämmschicht [cm]	U [W/(m²·K)] λ [W/(m·K)]				Wandaufbau
			0,022	0,024	0,032	0,035	
	29,5	10	0,20	0,22	0,29	0,31	<b>Einschalige KS-Außenwand mit Wärmedämm-Verbundsystem</b> $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{·K)/W}$ $\lambda = 0,70 \text{ W/(m·K)}$ 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8) <sup>1)</sup> $\lambda = 0,99 \text{ W/(m·K)}$ Wärmedämmstoff Typ WAP 0,01 m Außenputz $\lambda = 0,70 \text{ W/(m·K)}$ $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{·K)/W}$
	33,5	14	0,15	0,16	0,21	0,23	
	35,5	16	0,13	0,14	0,19	0,20	
	39,5	20	0,11	0,11	0,15	0,16	
	43,5	24	0,09	0,10	0,13	0,14	
	49,5	30	0,07	0,08	0,10	0,11	
	41,0	10	0,19	0,21	0,27	0,29	<b>Zweischalige KS-Außenwand mit Wärmedämmung</b> $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\text{·K)/W}$ $\lambda = 0,70 \text{ W/(m·K)}$ 0,175 m Kalksandstein (RDK 1,8) <sup>1)</sup> $\lambda = 0,99 \text{ W/(m·K)}$ Wärmedämmstoff Typ WZ 0,01 m Fingerspalt $R = 0,15 \text{ (m}^2\text{·K)/W}$ 0,115 m <sup>2)</sup> KS-Verblendschale $\lambda = 1,1 \text{ W/(m·K)}$ (KS Vb RDK 2,0) <sup>1)</sup> oder verputzte KS-Vormauerschale $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{·K)/W}$
	43,0	12	0,16	0,18	0,23	0,25	
	45,0	14	0,14	0,16	0,20	0,22	
	47,0	16	0,13	0,14	0,18	0,19	
	49,0	18	0,11	0,12	0,16	0,17	
	51,0	20	0,10	0,11	0,15	0,16	
	55,0	24	0,09	0,09	0,12	0,13	

Abbildung 64: U-Werte von einschaligen und zweischaligen KS-Außenwänden mit Wärmedämmung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämm-Materials [7]

Aus Abbildung 64 geht hervor, dass für den einschaligen Aufbau die U-Wert-Berechnung mit einem Wärmedämmstoff Typ WAP (Außendämmung der Wand unter Putz) durchgeführt wurde. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr.}$  des Dämmstoffes liegt hier zwischen 0,022 und 0,035 W/(m·K). Mit dem Einsatz von CALOSTAT®, welches eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{10, tr.} = 0,019 \text{ W/(m·K)}$  besitzt, würden demnach noch geringere Wärmedurchgangskoeffizienten bei identischer Wanddicke erreicht werden. Ebenso können durch den Einsatz von CALOSTAT® gleiche U-Werte bei geringerem Wanddurchmesser realisiert werden.

### Berechnungsbeispiele für die vorgestellten Bauten

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die damit verbundene Dämmwirkung von CALOSTAT® ist der Einsatz des Hochleistungsdämmstoffs sowohl für Neubauten als auch in Sanierungsarbeiten denkbar. Um einen Anhaltspunkt für die Effektivität der Dämmung zu gewinnen, wurden im Folgenden theoretische U-Werte vor und nach den Sanierungsarbeiten ermittelt. Hierzu wurde der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) nach DIN EN ISO 6946 für ausgewählte Wandaufbauten berechnet:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$R_T$  : Wärmedurchgangswiderstand der Wandkonstruktion

Um den Gesamt-Wärmeübergangswiderstand  $R_T$  einer Wandkonstruktion zu berechnen, wurde vereinfachend angenommen, dass die Teil-Wärmeübergangswiderstände auf der Innen- bzw. Außenseite der Wand  $R_i = 0,125$  bzw.  $R_a = 0,04$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ) betragen. In Tabelle 6 wird die Verringerung der Wärmeverluste durch den Einsatz von CALOSTAT® als Wärmedämm-Material für Wohnhäuser der 1950er, 1970er und 1983er Jahre dargestellt. Außerdem wurde die Absenkung des U-Wertes durch Ersatz der ursprünglichen Wärmedämmung durch CALOSTAT® betrachtet.

Tabelle 6: Vergleich der theoretischen U-Werte mit einer zusätzlichen Vorsatzschale

Typ	Typischer U-Wert einer Bestandswand [W/(m <sup>2</sup> K)]	U-Wert der Fassade mit CALOSTAT-gefüllter Vorsatzschale [W/(m <sup>2</sup> K)]	Absenkung des U-Wertes [%]
Wohnhaus der 1950er (Fassade aus Vollziegeln)	1,99	0,185	~ 90
Plattenbau der 1970er (Einschalige Bauweise)	0,64	0,154	~ 75
Wohnhaus der 1980er (Mehrschalige Bauweise)	0,29	0,122	~ 55

Tabelle 7: Vergleich der theoretischen U-Werte der Gebäudehüllen mit den theoretisch zu erreichenden U-Werten durch Austausch der ursprünglichen Dämmung mit CALOSTAT®

Typ	Typischer U-Wert der Ausgangs-Fassade [W/(m <sup>2</sup> K)]	U-Wert der Fassade mit CALOSTAT®-Einsatz [W/(m <sup>2</sup> K)]	Absenkung des U-Wertes [%]
Bestandsgebäude mit Vorhangfassade	0,25	0,14	~ 45
Kalksandsteinhaus (Neubau, einschalige Bauweise)	0,29	0,15	~ 50
Neubau mit Natursteinfassade	0,33	0,17	~ 45

Aus Tabelle 7 geht hervor, dass mit dem Einsatz von CALOSTAT® als Wärmedämmstoff in den gezeigten Wandsystemen eine Verbesserung des U-Wertes um 45 – 50 % zu erwarten ist. Aufgrund der sehr geringen thermischen Leitfähigkeit von CALOSTAT® ( $\lambda_{10,\text{tr}} = 0,019$  W/(m·K)) werden demnach geringere Wärmedurchgangskoeffizienten bei identischer Wanddicke erreicht. Ebenso können durch den Einsatz von CALOSTAT® gleiche U-Werte bei geringerem Wanddurchmesser realisiert werden.

#### Dachsanierung von Bestandsgebäuden unter CALOSTAT-Einsatz

Als weitere Einsatzmöglichkeit bei der wärmetechnischen Ertüchtigung von Bestandsgebäuden wird im Folgenden der Einsatz von CALOSTAT als Dämmstoff für Schrägdächer betrachtet. CALOSTAT könnte auch in diesem Anwendungsfeld eingesetzt werden und die etablierten Dämmstoffe wie EPS, Styropor oder Mineralwolle ersetzen. Durch den Einsatz von CALOSTAT würden die Wärmeverluste, die gerade bei Dachflächen besonders hoch sind, durch seine deutlich besseren Wärmedämmeigenschaften verringert werden. Die wärmetechnischen Berechnungen beziehen sich hierbei auf ein

durchschnittliches Steildach, welches mit Gipskarton-Platten (DIN 18180,  $\lambda_{10, tr.} = 0,250 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Schichtdicke  $d = 1,25 \text{ cm}$ ) und einem Faserdämmstoff (DIN 18 165/1,  $\lambda_{10, tr.} = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Schichtdicke  $22,0 \text{ cm}$ ) errichtet wurde.

Die wärmetechnischen Berechnungen ergaben, dass der Einsatz von CALOSTAT als Wärmedämmstoff den berechneten U-Wert des Daches von  $0,2000 \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K})]$  auf  $0,1398 \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K})]$  absenken kann. Dies entspricht einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um ca. 30 %.



Abbildung 65: Dachsanierung eines Altbaus mit Zwischen- und Aufsparrendämmung [8]

## Zusammenfassung

Die Auswertung der Sensor-Messdaten aus dem Baustoff-Monitoring wird weiterhin fortgesetzt. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Ermittlung der U-Werte der Wände gelegt, welche mittels FEM-Simulation sowie mittels Thermografie-Aufnahmen der Gebäudehülle näher untersucht werden sollen (Abbildung 66). Aus der Gegenüberstellung der berechneten U-Sollwerte mit den vor Ort ermittelten U-Werten geht hervor, dass die gemessenen U-Werte unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit von 20 % im Bereich der vorhergesagten U-Sollwerte liegen. Dabei ist zu beachten, dass bei einigen Häusern die gemessenen U-Werte die U-Sollwerte unterschreiten. Die ermittelten U-Werte bilden die Trends der wärmetechnischen Erwartungen an die Gebäudehüllen ab: Die CALOSTAT-Häuser besitzen die geringsten U-Werte und sind damit am besten gedämmt. Die anderen vier Vergleichshäuser weisen bzgl. der Wärmedämmung ebenfalls sehr gute Werte auf und entsprechen dem Stand der Technik. Um die Qualität des Sensorkonzeptes endgültig bewerten und damit einen Leitfaden zum praktischen Einbau von Sensoren in ein Wandsystem erstellen zu können, finden derzeit Auswertungen der Messergebnisse des Monitorings der Gebäudehülle sowie weiterführende Untersuchungen statt.

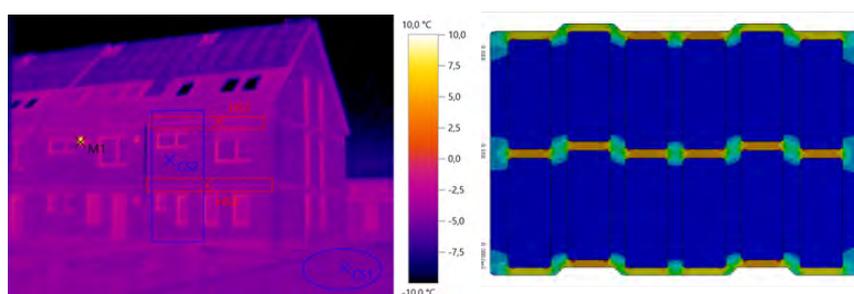


Abbildung 66: Thermografie-Aufnahme der Gebäudehülle mittels einer Wärmebildkamera (links); Schematische Abbildung von mittels FEM-Simulation detektierter Wärmebrückenbildung im Wandbaustoff Ziegel (rechts)

### 1.3.2 Gebäudetechnik: Monitoring und Betriebsoptimierung

Die Reihenhäuser, die als "KfW-Effizienzhaus 40 Plus" errichtet wurden, werden seit drei Jahren von April 2018 bis März 2021 energetisch gemonitort. Die Idee, dass kleine Nachbarschaften eine Energiegemeinschaft bilden und Energiesysteme gemeinsam nutzen, ermöglicht ein höheres Potenzial zur Steigerung des PV-Eigenverbrauchs. Außerdem führen Synergien zwischen verschiedenen elektrischen Lasten zu einem gleichmäßigen elektrischen Profil und reduzieren elektrische Lastspitzen. Das vollelektrische Gebäude ist mit zwei geothermischen 17-kW-Wärmepumpen (B0/W35), acht dezentralen Wärmepumpen zur Warmwasserbereitung (Booster), einer 40 kWh-Batterie und einer 88-kWp-PV-Anlage ausgestattet. Die frequenzgeregelten Wärmepumpen (MWP) sind im Parallelbetrieb installiert, um hauptsächlich im Teillastbereich zu arbeiten und den hohen COP zu nutzen sowie das Erdreich gleichmäßig zu belasten. Sieben Bohrungen

mit je 100 m Tiefe liefern die Wärmequelle und bieten im Sommer passive Kühlung. Die Quelle der Booster erfolgt über die Pufferspeicher. Der Vorteil dieses Energiesystems ist die Ausnutzung des zeitlich unterschiedlichen Energieverbrauchs durch das unterschiedliche Nutzerverhalten, was zu einer Reduzierung der elektrischen Lastspitzen und einem höheren PV-Eigenverbrauch führt. Neben den energetischen Vorteilen ermöglicht die gemeinsame Nutzung des Energiesystems zusätzlich Investitions- und Betriebskosten für jedes Reihenhäuser zu senken. Das Energiekonzept ist darauf ausgerichtet, die Energieeffizienz zu steigern, Lastspitzen zu reduzieren und den PV-Eigenverbrauch zu erhöhen. Abbildung 67 zeigt das Energiekonzept der Herzo Base – Reihenhäuser.

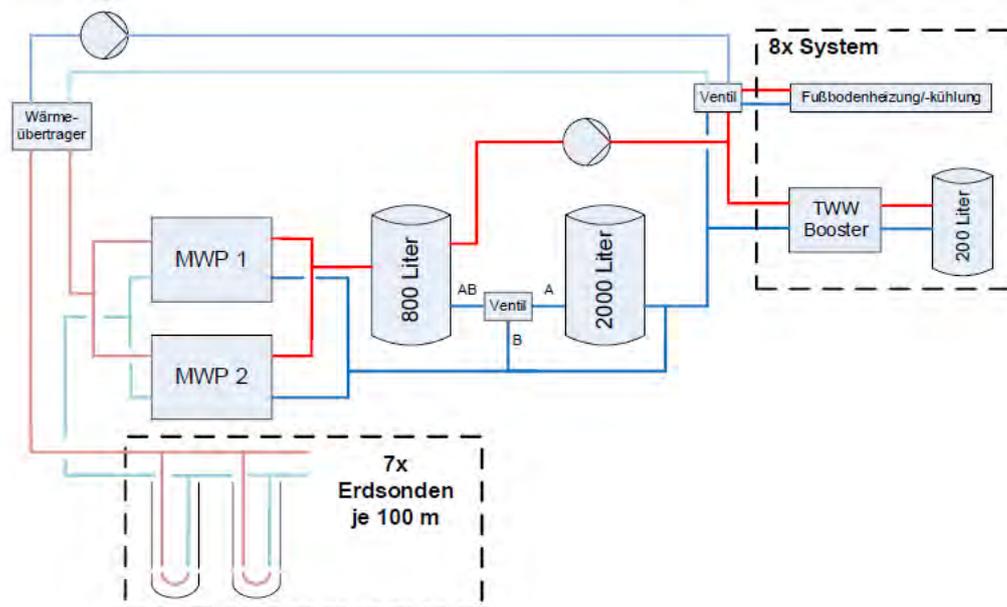


Abbildung 67: Energiekonzept der Herzo Base - Reihenhäuser mit geothermischen Wärmepumpen und dezentralen Boostern

Zur energetischen Bewertung des Reihenhauses wird seit April 2018 ein umfangreiches Monitoring durchgeführt. Dabei werden alle relevanten Daten des Energiesystems zur Erstellung von Energiebilanzen erfasst. Temperatur und Energieverbrauch werden vor und nach jeder Energiekomponente und Speichereinheit gemessen. Außerdem werden die Soll- und Ist-Raumtemperaturen und die Feuchtigkeit in jedem Stockwerk gemessen. Ein Ziel des Monitorings ist die Auswertung der Plus-Energie-Bilanz. Als weiterer Aspekt werden die Lastanpassung der energiegemeinschaftlichen Nutzung sowie PV-Ertrag im Sinne des Eigenverbrauchs untersucht. In diesem Zusammenhang sind auch der Einsatz und die Verfügbarkeit von thermischen und elektrischen Speichern als lokale Speichermöglichkeit von Interesse. Zur Bewertung des gesamten Reihenhauses inklusive Haushaltsstrom werden Verbrauch und Erzeugung gegenübergestellt.

Im ersten Monitoringjahr lag der gesamte jährliche Stromverbrauch bei ca. 38 kWh/(m<sup>2</sup>a) (45.729 kWh/a). Auf die MWP entfallen ca. 28 %, auf die Booster ca. 14 %, auf die GLT ca. 10 % und auf den Haushalt ca. 43 % des Jahresenergieverbrauchs. Der Jahresheizenergieverbrauch (Heizung, Warmwasser) beträgt ca. 55 kWh/(m<sup>2</sup>a) (66.027 kWh/a). Die Raumheizung hat einen Anteil von ca. 53 %, die Warmwasserbereitung von ca. 35 % und die passive Kühlung von 12 % am Jahresenergieverbrauch. Der Ertrag der PV-Anlage beträgt ca. 86 MWhel/a und liefert ca. 43 % mehr als der jährliche elektrische Gesamtenergieverbrauch. Die Endenergiebilanz erreicht im ersten Jahr einen Wert von -34,5 kWh/(m<sup>2</sup>a), d.h. einen PV-Überschuss von 34,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) bezogen auf den Gesamtverbrauch. Die Primärenergiebilanz ergibt einen Überschuss von 62,0 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Inbetriebnahme der PV-optimierten Regelung im zweiten Monitoringjahr führte zu einer Steigerung des PV-Eigenverbrauchs von 32 % auf 37 %. Abbildung 68 zeigt den Anteil an PV Direktnutzung, Batterie und Netzbezug/-einspeisung für Verbrauch und Ertrag der drei Jahre (links) sowie monatlicher Ertrag und Verbrauch mit PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad (rechts).

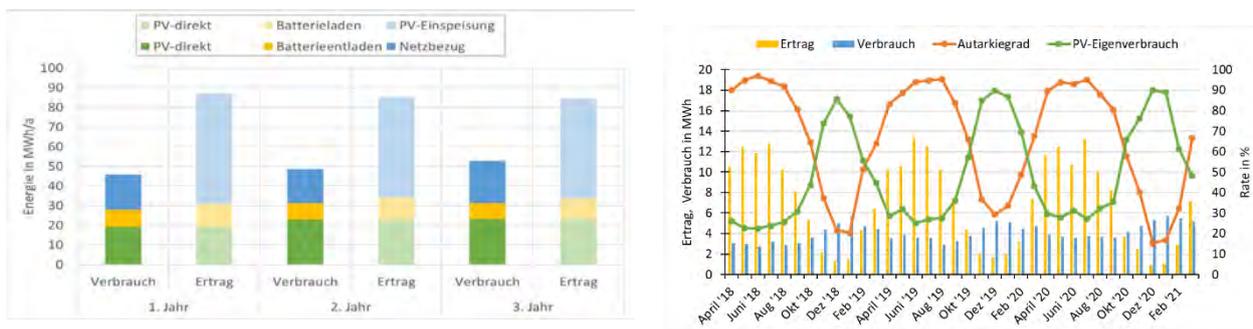


Abbildung 68: Verbrauchs- und Ertragsanteile am Gesamtstromverbrauch (links) sowie PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad von drei Jahren für den Gesamtenergieverbrauch (rechts)

Aktuell ist der Strompreis hoch und die Einspeisevergütung wird für neu installierte PV-Anlagen jährlich reduziert. Daher wird der PV-Eigenverbrauch wirtschaftlich interessant. Aus der Mischung von Netzbezugskosten, laufenden PV-Kosten und Batterieverlustkosten ergeben sich sehr günstige laufende Stromkosten für die Gemeinschaft der Eigentümer. Damit verknüpft sind jährliche Verbrauchsabrechnungen und Überschuss-Gutschriften an die 8 Haushalte. Die Kosten eines durchschnittlichen Haushalts für Strom, Heizung und Warmwasser lagen in 2018 unter 250 €. Inklusive der Nutzung von Direkt-PV und Batterie werden 59 % bis 65 % des Gesamtverbrauchs durch selbst erzeugten Strom gedeckt.

Als Hauptkomponente des Energiesystems stehen die MWP im Fokus der Effizienzbewertung. Der Wärmeentzug aus den Erdsonden liegt zwischen 47,7 MWh und 53,1 MWh bei einer Wärmeerzeugung an das Gebäude zwischen 55,5 MWh und 62,7 MWh. Der Wärmeeintrag in die Erdsonden durch passives Kühlen liegt zwischen 10,0 MWh und 12,2 MWh. Der Monitoringzeitraum ist von April 2018 bis März 2021.

Die JAZ der MWP-Anlage liegt mit 5,6/4,9/4,8 in einem sehr guten Bereich für Erdwärmepumpen, wie in Abbildung 69 dargestellt ist. Die sehr guten Werte im 1. Jahr wurden durch den Betrieb im Sommer beeinflusst, als die thermischen Speicher auf niedrige Temperaturniveaus von 25 °C und 27 °C geladen wurden. Höhere Speichertemperaturen aufgrund der PV-optimierten Regelung im 2. und 3. Jahr reduzieren die JAZ, erhöhen jedoch den Autarkiegrad. Die JAZ der Boosteranlagen liegen bei 4,0/4,0/4,3 und sind damit sehr gut für die Bereitstellung von hohen Speichertemperaturen. Aufgrund von hoher Hilfsenergie, z.B. Umwälzpumpen und Zirkulation, sind die JAZ des Gesamtsystems jedoch bei 3,4/3,3/3,3.

Basierend auf den Monitoringergebnissen des ersten Jahres wurden Optimierungsmaßnahmen umgesetzt und durch die Ergebnisse im zweiten Jahr bestätigt. Durch die Änderung der Regelstrategie der Wärmepumpen konnte der PV-Eigenverbrauch um 12,5 % erhöht werden. Dies führt zu einer Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs von 32 % auf 37 % und zu einer Erhöhung des Autarkiegrades von 61 % auf 65 %. Gleichzeitig sank der PV-Ertrag leicht um 2,2 %.

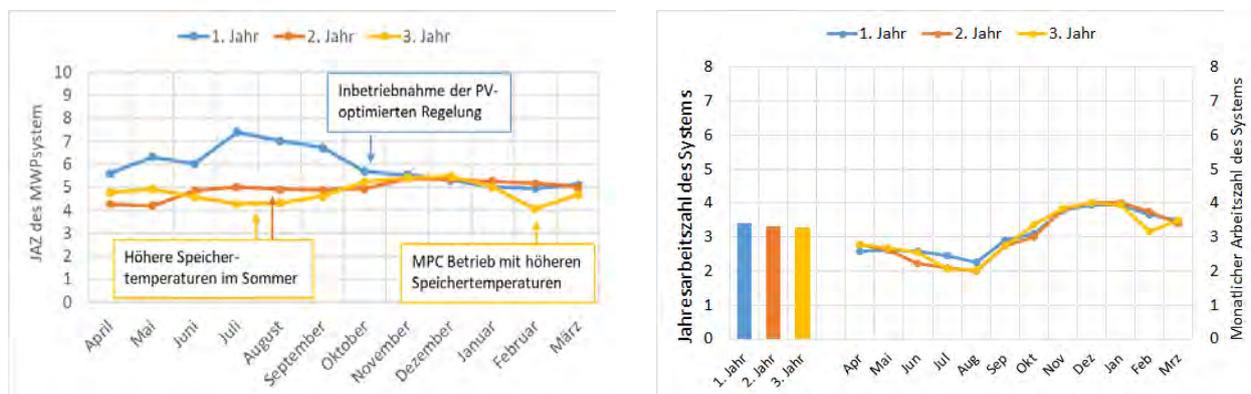


Abbildung 69: Jahresarbeitszahlen und monatliche Arbeitszahlen der MWP (links) sowie des Systems (rechts).

Mittels Simulation wurde für das Sommerhalbjahr das Betriebsoptimum des Batteriespeichers bei einer maximalen solaren Ladeleistung von 9 kW ermittelt. Das Ziel hierbei war, die Effizienz der Batterie und den finanziellen Nutzen für die Hausgemeinschaft zu steigern. Im Sommer 2020 wurde dies umgesetzt und eine Effizienzsteigerung um knapp 3,0 %

und eine Kostensenkung um 70 €/Jahr realisiert (Abbildung 70). Zudem wird auch die Lebensdauer der Batterie verlängert.

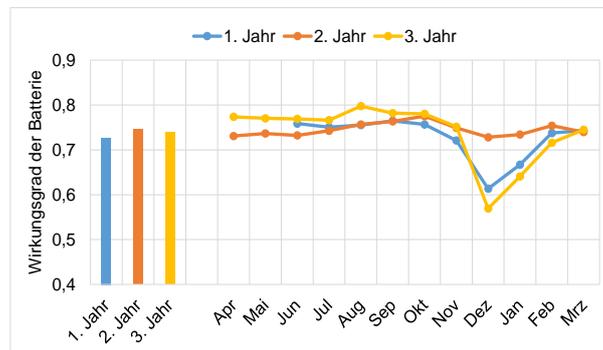


Abbildung 70: Wirkungsgrad des Batteriespeichers

Zwei der acht Haushalte besitzen mittlerweile Elektro- bzw. Hybrid-Autos. Diese werden derzeit zuhause über die Steckdose im Carport geladen, für die jeweils ein separater Stromzähler installiert wurde. Seit dem 18.01.2021 liegen die Verbrauchsdaten dazu vor. Diese sind in Abbildung 71 für einen der Haushalte dargestellt.

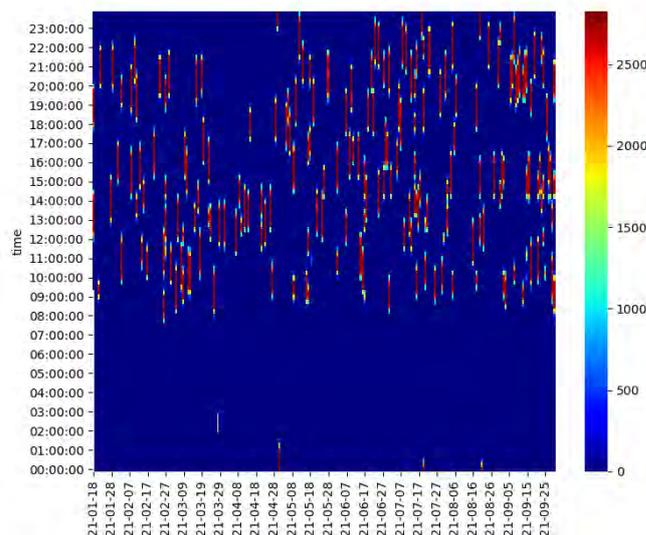


Abbildung 71: Ladegewohnheiten eines Haushalts

Das in Abbildung 71 dargestellte Ladeverhalten zeigt eine maximale Ladeleistung von 2,848 kW. Das entspricht der maximal möglichen Leistung, die für dieses Fahrzeug über Steckdose möglich ist. Das E-Auto wird vor allem in den Uhrzeiten zwischen 09:00 Uhr und 23:00 Uhr geladen. Bei zufälligem Ladestart in diesem Zeitraum beträgt die Ladedauer jeweils 2 Stunden, was einer Vollladung bei der Batteriekapazität des Plugin-Hybrids entspricht. Mithilfe intelligenter Ladetechnik könnten die Autoladungen vermehrt in die Zeiten zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr verschoben werden, was dem Netz sowie dem Lastmanagement des einzelnen Gebäudes dient. Dies ist aktuell Gegenstand unserer Forschung. Als Basis für intelligente Ladealgorithmen dienen Stromlastprognosen.

Aus den Stromverbrauchsdaten konnten mithilfe verschiedener Algorithmen Vorhersagen über den Stromverbrauch der kommenden 24 Stunden getroffen werden. Es wurden zusätzlich Vergleiche zwischen den Haushaltslastprofilen und dem BDEW-Standardlastprofil erstellt und deren Streubreite ermittelt. Es wurde jeweils der RMSE und der MAPE zwischen den realen Werten und den Prognosewerten sowie zwischen den realen Werten und dem BDEW-Standardlastprofil ermittelt. Als Prognosemethoden wurden die Holt-Winters-Methode, SARIMA und künstliche neuronale Netze (Multilayer-Perceptron und CNN-LSTM) eingesetzt. Tabelle 8 zeigt, dass mit den angewandten Algorithmen bessere Ergebnisse erzielt werden, als mit der einfachen Persistenzprognose sowie der Prognose mittels BDEW-Standardlastprofil.

Tabelle 8: Gebäudelastprognose, Trainingsdaten vom 01.05.2018 bis zum 29.12.2019, Testdaten vom 30.12.2019 bis zum 29.12.2020, Mittelwert der Last im Testzeitraum: 942,03 Wh/15min

Modell	RMSE [Wh/15min]	RMSE (relativ)	MAPE
MLP	365,17	0,388	25,44%
CNN-LSTM	386,27	0,410	24,66%
MLP (+ Tage)	369,78	0,393	24,96%
CNN-LSTM (+ Tage)	373,60	0,397	26,22%
Holt-Winters	392,23	0,416	33,74%
SARIMA	342,17	0,363	27,14%
BDEW-Standardlastprofil	409,19	0,434	35,9%
Persistenzprognose	456,34	0,484	34,45%

Die Prognoseverfahren wurden auch dafür verwendet, um die Netzlast im Versorgungsgebiet der HerzoWerke vorherzusagen. Dies dient als Basis der geplanten Betriebsstrategie für das netzdienliche Laden von E-Autos. Die Netzlast kann mithilfe der Holt-Winters-Methode mit einer Genauigkeit von 95% für die nächsten 12 Stunden und mit einer Genauigkeit von 94% für die nächsten 24 Stunden vorhergesagt werden. Die Prognose mittels Holt-Winters Methode ist in Abbildung 72 dargestellt. Somit erscheint es erfolgversprechend, die Leistung der Ladestation so zu beeinflussen, dass in Hochlastzeiten des Netzes das Auto nur mit reduzierter Leistung geladen wird. Eine entsprechende Ladesteuerung ist im Labor am EnCN aufgebaut und getestet, demnächst erfolgt der Einbau in Herzobase (Abbildung 73).

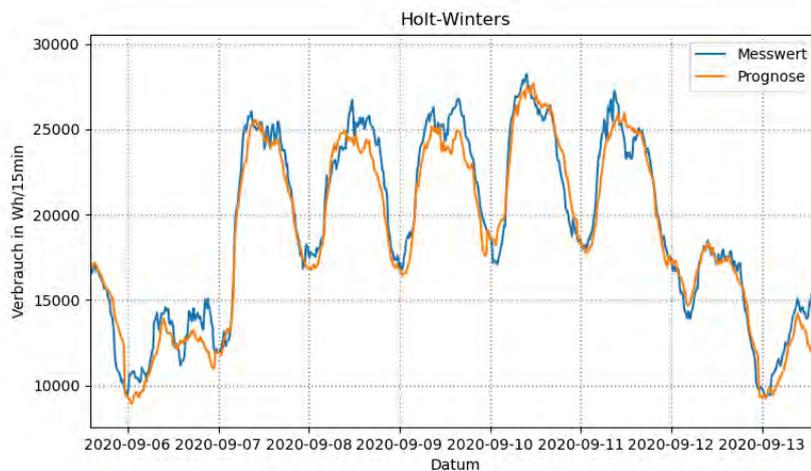


Abbildung 72: 24-Stunden-Prognose der Netzlast mittels Holt-Winters-Verfahren für eine zufällig ausgewählte Woche dargestellt

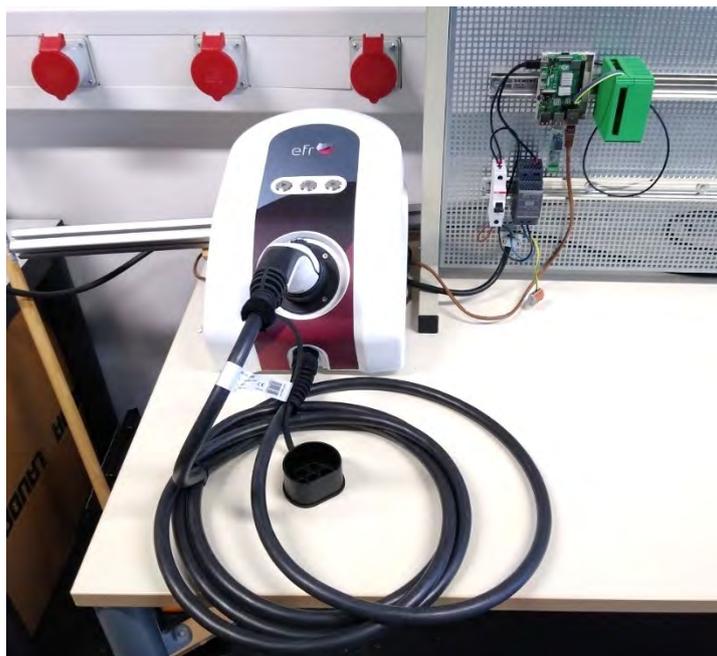


Abbildung 73: Versuchsaufbau für die Entwicklung und Testen der Ladesteuerung im Labor am EnCN.

#### **1.4 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 Thermografiekameras die thermischen Verluste von Gebäuden zu erfassen und interaktiv zu visualisieren. Die Gebäudehülle soll auf Basis der erfassten optischen und thermografischen Aufnahmen in dreidimensionaler Form so rekonstruiert werden, so dass diese über eine intuitive Benutzerschnittstelle von allen Seiten aus betrachtet werden und deren Oberflächentemperatur analysiert werden kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zunächst Verfahren untersucht bzw. entwickelt, die auf Basis von Infrarot-Videomaterial eine Rekonstruktion der abgebildeten 3D-Strukturen ermöglicht. Zunächst wurden diese Arbeiten auf Basis der vorhandenen IR-Drohnenaufnahmen von Photovoltaikanlagen, die das ZAE-Bayern im vergangenen Projektzeitraum durchgeführt hatte, durchgeführt. Es zeigte sich, dass wegen der geringen Detailgenauigkeit der IR-Aufnahmen, die eine zuverlässige Zuordnung von Punkten in Bildpaaren praktisch unmöglich machen, auch optische Aufnahmen notwendig sein würden, um eine brauchbare Rekonstruktion von 3D-Information zu ermöglichen.

Im Sommer 2018 konnte aus Mitteln der TH Nürnberg eine moderne, leistungsfähige Drohne DJI Matrice M210 mit hochwertiger RGB- und Infrarotkamera beschafft werden, die ausschließlich für dieses Arbeitspaket zur Verfügung stand. Mit dieser Drohne wurden im Laufe des Projekts zahlreiche Flüge durchgeführt und Aufnahmen von unterschiedlichsten Gebäuden gesammelt, darunter Hochschul- und Universitätsgebäude, Rathäuser, Schulen, Behörden, historische Gebäude und Einfamilienhäuser im Großraum Nürnberg. Die Erfassung der Gebäude (mit entsprechendem Vorlauf für die Einholung der Genehmigungen der Flüge) geschah dabei jeweils mittels Thermographie-Kamera, optischer Kamera, Stereo-Kamera und Tiefenkamera. Die so entstandenen parallelen Videoaufnahmen von Gebäuden im optischen und infraroten Spektralbereich sind in der wissenschaftlichen Welt bislang einzigartig und bildeten die Grundlage für die weiteren Arbeiten.

Der entscheidende Schritt bei der Verarbeitung der parallel entstandenen Aufnahmen im thermischen und sichtbaren Bereich ist die exakte Registrierung der Bildpaare, d.h. die optimale geometrische Überlagerung der Bilder der beiden Kameras, unter Berücksichtigung möglicher Verzerrungen. Auf diese Weise kann die Rekonstruktion der 3D-Struktur mittels der optischen Aufnahmen geschehen und die Thermografieaufnahmen anschließend mit dem Modell überlagert werden. Diese Bildregistrierung stellte sich als unerwartet anspruchsvoll heraus, da die sichtbaren Kanten in Wärmebild

und im optischem Bild nicht immer mit der gleichen Objektkante zusammenfallen, so u.U. etwa im Fall von Innen- und Außenkanten von Fensterrahmen. Auch sind Kanten manchmal nur in einer der beiden Modalitäten sichtbar.

Da die beiden Kameras nicht fest an der Drohne montiert sind, sondern zur Bildstabilisierung separat an Gimbals (motorisierten kardanischen Bildstabilisatoren) aufgehängt sind, muss die Bildregistrierung für jedes Bildpaar separat ermittelt werden.

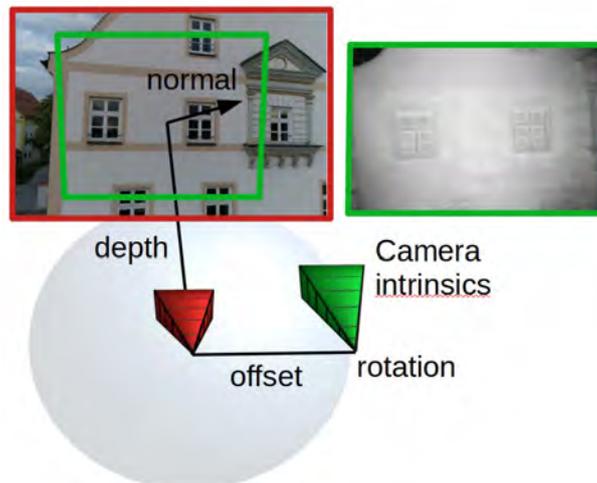


Abbildung 74: Bildregistrierung (optische Aufnahme mit größerem Bildwinkel links, Thermografieaufnahme aus der gleichen Drohnenposition mit engerem Bildwinkel rechts) unter Einsatz der speziellen Kameramodellierung.

Da die Rohdaten zeitlich nicht synchronisiert sind, ist eine Synchronisierung zwingend notwendig. Dadurch werden Parallaxen in den Bilddaten minimiert. Zudem setzt das in der Registrierungs pipeline verwendete Kameramodell synchrone Bilddaten voraus.

In einer Testreihe wurden verschiedene Kombinationen von Algorithmen evaluiert, darunter Verfahren auf Basis des Optischen Flusses und Neuronale Netze. Auf dem Testdatensatz mit 9 Video-Sequenzen konnte mit dem besten Verfahren eine mittlere Genauigkeit von 0,033 Sekunden erreicht werden, das entspricht dem Zeitabstand zwischen zwei Video-Frame der thermischen Kamera.

Zur Lösung des Problems der Bildregistrierung wurde eine Verarbeitungspipeline entwickelt, die neben den beiden Aufnahmen auch noch die Bilder der zusätzlichen Stereokamera zur Tiefenschätzung einbeziehen kann. Es zeigte sich dabei, dass eine wirklich zuverlässige Lösung dieses Problems wohl nur mittels des Einsatzes von Deep-Learning-Verfahren möglich sein würde, die auf einer ausreichend großen Menge von Bildpaaren trainiert sind.

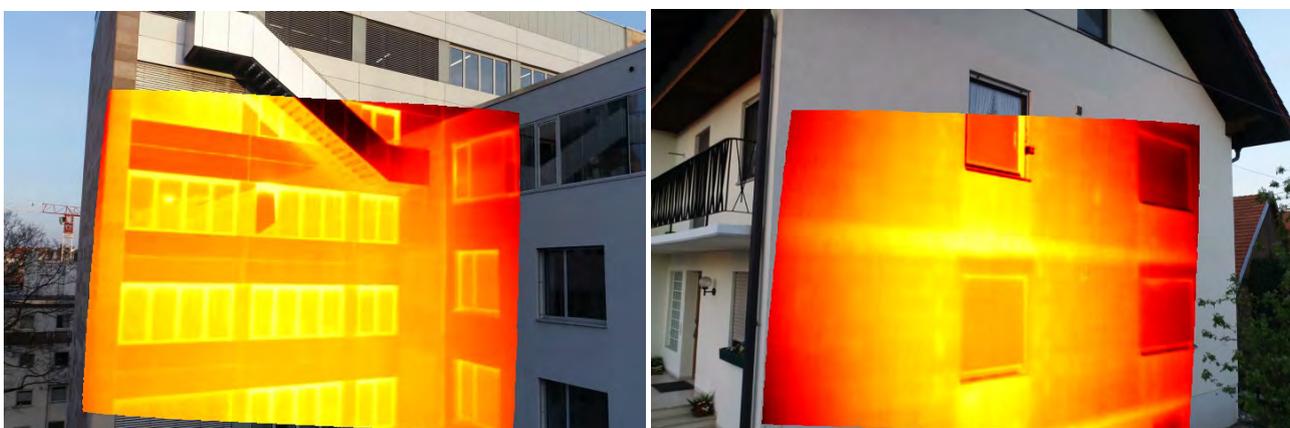


Abbildung 75: Drohnenaufnahmen von Gebäuden mit optischer Kamera und korrekt registrierter Thermografieaufnahme

Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurde die Bildregistrierungspipeline zu einem semi-automatischen Prozess erweitert, mit dessen Hilfe eine Vielzahl von Bildpaaren in überschaubarer Zeit mit einer sogenannten Ground-Truth-Annotation

versehen werden können. Aktuell sind 5.057 Paare von thermischen und optischen Bildern von 25 Gebäuden mit einer solchen, exakten und händisch überprüften Registrierung (sog. Homographie-Matrizen) versehen. Dies ist nach unserer Kenntnis der weltweit größte Datensatz für diese Problemstellung.

## 1.5 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 76):

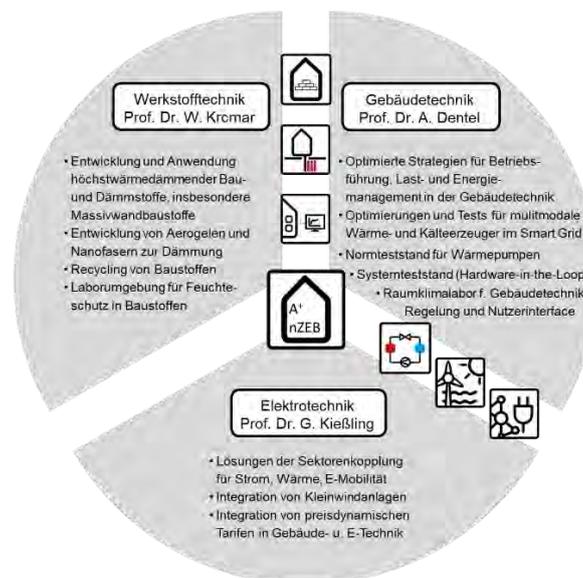


Abbildung 76: Strategische Weiterentwicklung der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“.

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:

- 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 (Ablehnung 2021-05. Nötiger Score erreicht, aber aufgrund der sehr starken „Überbuchung“ aussortiert.)
- 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. Halio 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 Energietechnik, 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. 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

Im Projekt wurden vorrangig Mehrphasenmaschinen mit einer Strangzahl von  $m = k \cdot a$  untersucht. Dabei wird die Wicklung der rotierenden elektrischen Maschine aus  $k$  Wicklungssystemen mit je  $a$  Subphasen aufgebaut. Die Anzahl der Subphasen ist ungerade und weist zur Entlastung des Sternpunktes eine Phasenverschiebung von  $\varphi = 2\pi/a$  auf. Die Sternpunktentlastung bei Mehrphasensysteme mit gerader Strangzahl und einem Vielfachen von  $a$  werden durch eine Phasendrehung von  $\varphi_m = \pi/m$  der  $k$  Wicklungssysteme zueinander realisiert. Für den Betrieb der Maschine an Standardumrichtern sind besonders Strangzahlen  $m = k \cdot 3$  von besonderem Interesse.

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. Im Projekt wurde aus diesem Grund ein algebraischer Wicklungsentwurf für Maschinen mit Strangzahlen  $m = k \cdot a$  entwickelt. 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 abgedeckt wird. Ein 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.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zudem (semi-)analytische Berechnungsmodelle auf Basis der Drehfeldtheorie entwickelt, um das Grund- und Oberfeldverhalten von Mehrphasenmaschinen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Aufbauend auf diesen Modellen wurden (semi-)analytische Berechnungsmethoden zur Abbildung des Oberschwingungsverhalten bei Umrichterspeisung erarbeitet, um die für Mehrphasenmaschinen besonders kritischen Oberschwingungsverluste in der Auslegungsphase bestimmen zu können. Numerische Berechnungsverfahren mittels der Finite Elemente Methode (FEM) werden herangezogen, um die Genauigkeit der Vorausberechnung weiter zu steigern. Die erfolgten Untersuchungen zeigen, dass die konventionellen FEM-Modelle erweitert werden müssen, um spezifischen Besonderheiten von mehrphasigen Maschinen berücksichtigen zu können. Zum einen sind ausschließlich mit spannungsgeführten Modellen spezifische Oberfelderscheinungen zu erfassen; zum anderen müssen die numerischen Modelle um ein externes Strangverschaltnetzwerk erweitert werden, um die kritische Kopplung über das Stirnstreufeld in das Kalkül einzubeziehen. Die damit verbundenen extrem langen Rechenzeiten werden durch eine vorgelagerte Grobauslegung mit den entwickelten Modellen deutlich reduziert.



*Abbildung 77: Konfiguration VM316 als konventionelle dreisträngige Asynchronmaschine und Konfiguration VM631 mit  $m = 2 \cdot 3$*

Zur messtechnischen Verifikation der entwickelten Berechnungsmodelle wurde ein Prototyp VM631 der Baugröße 160 mit einer Strangzahl von  $m = 2 \cdot 3$  ausgelegt und gefertigt. Eine baugleiche Maschinenkonfiguration VM316 mit konventioneller, 3-strängiger Wicklung stand zu Referenzzwecken zur Verfügung (siehe Abbildung 77). Die Effizienzbestimmung nach Norm IEC 60034-2 bei sinusförmiger Spannungsversorgung wurde an beiden Versuchsmustern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass die entwickelten Berechnungsmodelle mit ausreichender Genauigkeit das Grundwellen-Betriebsverhalten der Mehrphasenmaschine abbilden können. Zum anderen konnte im direkten Vergleich mit der konventionellen Induktionsmaschine VM316 eine Verlustreduzierung bei den Ständerstromwärmeverlusten und den lastabhängigen Zusatzverlusten aufgezeigt werden.

Der drehzahlvariable Betrieb erfolgt durch die Umwandlung einer Gleichspannung in ein mehrphasiges Spannungssystem durch Pulsweitenmodulation aus den diskreten Schaltzuständen des Frequenzumrichters. Bei einem Zweipunkt-Spannungszwischenkreisumrichter resultieren  $2^m$  mögliche Schalterstellungen, wobei  $m$  die Phasenzahl darstellt. Höhere Phasenzahlen erhöhen damit exponentiell die zur Synthese der Ausgangsspannung zur Verfügung stehenden

diskreten Schaltzuständen des Umrichters. Die Anwendung einer generalisierten Raumzeigertransformation auf das mehrphasige System entkoppelt die vom Umrichter erzeugbaren diskreten Spannungen in eine drehmomentbildende Raumzeigerebene  $\alpha\beta$  und in Abhängigkeit der Strangzahl mehrere Zusatz-Raumzeigerebenen  $z$ . Letztere führen lediglich zu Stromüberschwingungen und somit zur Erhöhung der umrichterbedingten Zusatzverluste. Die Minimierung dieser Oberschwingungsströme bei gleichzeitiger Maximierung der drehmomentbildenden Grundschwingungskomponente stellt eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung mehrphasiger Pulsweitenmodulationen dar. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden verschiedene Modulationsverfahren für ein Antriebssystem, bestehend aus der Versuchsmaschine VM631 in Verbindung mit einem sechsphasigen Frequenzumrichter, entwickelt, implementiert und auf praktische Eignung untersucht.

Für den drehzahlvariablen Betrieb der Maschinenkonfiguration VM631 wurde ein sechsphasiger Spannungszwischenkreisumrichter entwickelt und aufgebaut. Im experimentellen Versuch konnte gezeigt werden, dass sich die umrichterbedingten Zusatzverluste der  $2 \cdot 3$ -strängigen Versuchsmaschine im Leerlauf durch die optimierten Pulsweitenmodulationsverfahren für hohe Aussteuergrade  $m$  um bis zu 20 % gegenüber nicht optimierten Modulationsverfahren reduzieren lassen. Abbildung 78 stellt die im Leerlauf gemessenen umrichterbedingten Zusatzverluste der implementierten Modulationsvarianten dar. Besonders vorteilhaft für hohe Aussteuergrade  $m$  erweisen sich optimierte diskontinuierliche Modulationen (DSVPWM24).

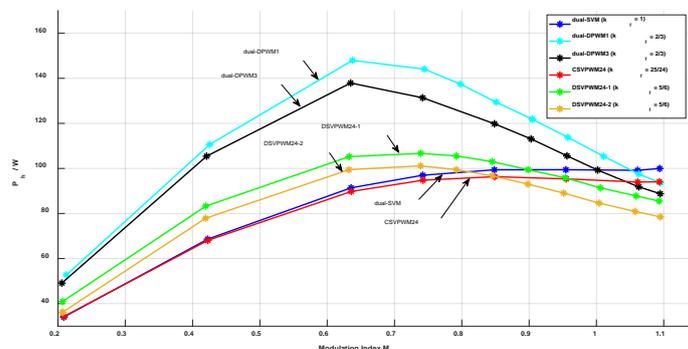


Abbildung 78: Umrichterbedingte Zusatzverluste in Abhängigkeit des Aussteuergrades: messtechnischer Vergleich verschiedener Modulationsverfahren an der  $2 \cdot 3$ -strängigen Versuchsmaschine.

Als 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 79 dargestellt.

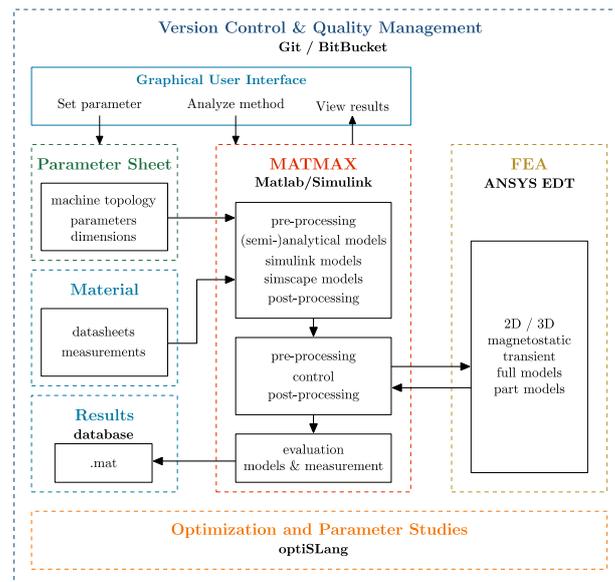


Abbildung 79: Schema Berechnungsprogramm zur Auslegung elektrischer Maschinen mit mehrsträngiger Wicklung.

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 Spannungszwischenkreisumrichter mit der Möglichkeit verschiedene Zwischenkreisverschaltungen zu realisieren. Außerdem können neben der konventionellen IGBT Technologie, auch zukunftssträchtige 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.

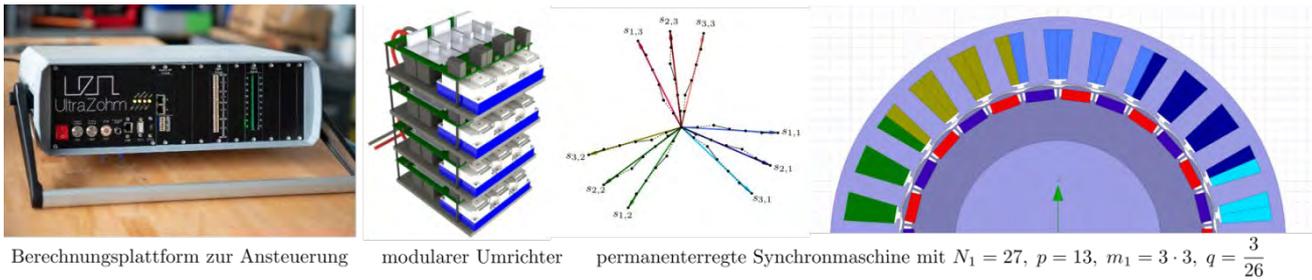


Abbildung 80: Komponenten des Antriebsstrangs zur Erprobung innovativer Antriebs- und Regelungskonzepte für mehrsträngige Maschinen.

### 2.3 Kooperation mit der Industrie

Im Rahmen der Förderphase des EnCN sind eine Vielzahl von Kooperationen auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik, insbesondere im Bereich Steigerung der Energieeffizienz entstanden. Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie waren und sind:



Abbildung 81: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft.

Aufgrund der Vielzahl an Industrieprojekten innerhalb der Förderphase sollen nachfolgenden einige ausgewählte Projekte aufgeführt werden.



Abbildung 82: Modellanlage des Kleinstwasserkraftwerks im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Forschungsprojekt BlauPower).

Im Bereich der Antriebstechnik am EnCN wurden innovative Maschinenkonzepte untersucht. 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.

Neben der Transversalflussmaschine wurden weitere innovative Maschinenkonzepte, wie die Partitioned Stator Flux Reversal Maschine (PS-FRPM) untersucht. Hierbei können bei gleichem Drehmoment Permanentmagnete und somit Seltene Erden Material eingespart werden.

Zwei Projekte hinsichtlich der Bestimmung umrichterbedingter Zusatzverluste durch Spannungszwischenkreis-umrichter in elektrischen Maschinen und der Untersuchung von Verlusten in oberflächenmontierten Permanentmagneten bei PM-Servomaschinen wurden erfolgreich durchgeführt.

In Kooperation mit den Industrieunternehmen Siemens AG, thyssenkrupp 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 Schnittkanten-einflüsse inklusive des Verschleißes von Stanzwerkzeugen, als auch Druck-Zug-Spannungen innerhalb des eingesetzten Werkstoffes Elektroblech untersucht. Am Messplatz zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften unterschiedlicher weichmagnetischer Materialien, aus der ersten Förderphase, stellen diese realitätsnah durchgeführten Versuche eine bisher einzigartige Möglichkeit zur Verbesserung der Berechnung elektrischer Maschinen dar. Die Ergebnisse wurden in Berechnungsmodelle überführt und durch Finite-Elemente Simulationen und der Auswertung einer großen Anzahl an Testmaschinen validiert.

Im Rahmen der Fördermaßnahme FHInvest durch das BMBF wurde das Projekt MeViSys gefördert. Der im EnCN Projekt eingerichtete Motorenprüfstand wurde um ein 3D-Scanning Laservibrometer inklusive Rotationsvibrometer zur kontaktlosen Schwingungsmessung erweitert. Diese Messgeräte sind elementarer Bestandteil der Verifizierung der Simulationsmodelle, die zur Untersuchung des Schwingungs- und Geräuschverhaltens elektrischer Maschinen entwickelt werden. Mithilfe dieser Modelle kann die Energieeffizienz von elektrischen Maschinen gesteigert und ihre Schwingungsbelastung verringert werden. Zudem ist es möglich, das Geräuschverhalten zu verbessern.

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der elektrischen Maschinen lassen den Trend erkennen, dass die bislang geltenden Drehzahlbereiche massiv nach oben erweitert werden. Nicht nur durch den Haupttreiber dieser Entwicklung, der Elektromobilität, wird dieser Trend befördert, sondern auch im industriellen Bereich werden zunehmend hohe Drehzahlbereiche bei der Anwendung elektrischer Antriebe sichtbar. Um in diesem Bereich zukunftssicher agieren zu können, investiert das Institut ELSYS, gefördert durch das BMBF Programm FH-Invest 2020, in einen Prüfstand für elektrische Hochdrehzahltriebe für Energie- und Mobilitäts-Anwendungen (ProEMA).



Abbildung 83: Beispiel für einen Hochdrehzahlprüfstand (Bild: [www.kratzer-automation.com](http://www.kratzer-automation.com))

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 Transversalflussmaschine. 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.).

## 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 Teamassistenz (halbe Stelle) tätig. Die Mitarbeiter haben hierbei die Förderung im genannten Themenfeld genutzt um neben der wissenschaftlichen Tätigkeit zusätzliche industriennahe Forschungsk Kooperationen anzustoßen. Wie in Abschnitt „Kooperationen“ genannt, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungsprojekte sowie Industrieprojekte entstanden.

### **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, M.Eng. Dennis Hufnagel, M.Sc. Timo Wilfling, M.Sc. Barnabas Haucke-Korber, M.Sc. Philipp Gebhardt, B.Eng. Thilo Wendt, B.Eng. Sven Rosenkranz*

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 künstlich intelligente Verfahren (KI).

Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Effizienzsteigerung des elektrischen Antriebsstranges durch Ansteuer- und Regelungskonzepte. Ziel ist es, neue Regelalgorithmen 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**

Das Institut ELSYS beschäftigt sich seit vielen Jahren mit neuartigen Regelungsverfahren, wie der modellprädiktiven Regelung (MPC). Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die Modelle zur Vorhersage des Maschinenverhaltens mit verschiedener Detailltiefe teilweise neu erstellt, verbessert und erweitert. In dem vergangenen Jahr wurde hierfür eine neue Herangehensweise für eine modellprädiktive Stromregelung entwickelt, die sowohl im stationären als auch transienten Betrieb eine gute Leistung erzielt, indem die Flussverkettungen der permanenterregten Synchronmaschine als Grundlage für das Berechnungsmodell verwendet werden. Ersteres wird erreicht, indem die optimalen Zeitpunkte berechnet werden, zu denen eine neue Schalterstellung auf den Umrichter angewendet wird. Zu diesem Zweck wird das künftige Stromverhalten nicht auf der Grundlage der Maschineninduktivitäten oder Induktivitätsnachschatgetabellen berechnet; stattdessen werden Flussverkettungskarten verwendet, um den Verlauf der magnetischen Flussverkettungen und damit des Stroms vorherzusagen. Dies ist vorteilhaft für elektrische Antriebe mit spürbarer magnetischer Nichtlinearität in Form von Sättigungs- und/oder Kreuzkopplungseffekten.

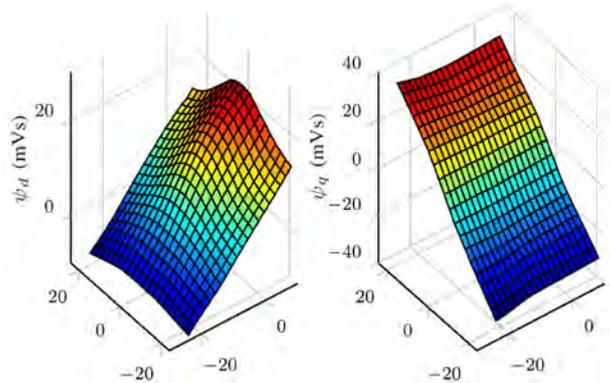


Abbildung 84: Identifizierte Flussverkettungen eines Motors mit Sättigungs- und Kreuzverkopplungseffekten.

Durch die Verwendung von Flussverkettungskarten im Vorhersageprozess kann die Entwicklung des Statorstroms genauer berechnet werden, so dass der Regler bessere Schaltentscheidungen treffen kann. Darüber hinaus zeigt der diskutierte prädiktive Regler eine ausgezeichnete dynamische Leistung aufgrund seiner direkten Regelung, d.h. die Regelungs- und Modulationsaufgaben werden in einer Rechenstufe durchgeführt, wodurch eine dedizierte Modulationsstufe überflüssig wird. Um das neuartige Regelungsverfahren zu verifizieren, wurden drei Antriebsstränge mit verschiedenen permanenterrregten Synchronmaschinen untersucht.

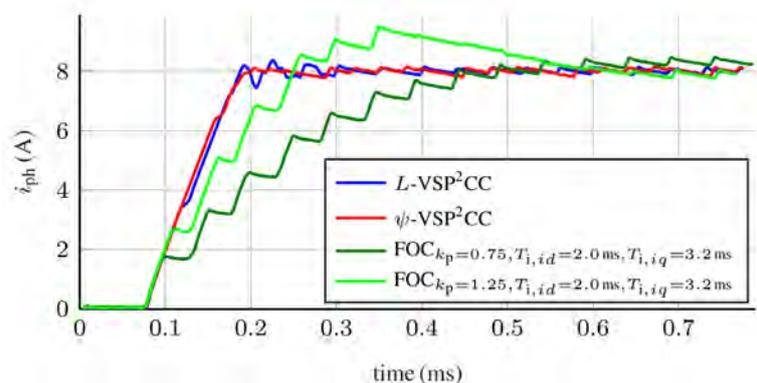


Abbildung 85: Statorstrom einer Phase während des Einschwingvorgangs bei Stillstand und Nennstrom.

Einerseits kann für transiente Zustände eine Verbesserung des Einschwingverhaltens festgestellt werden. Beide MPC-Verfahren, sowohl mit Motorinduktivitäten (L-VSP<sup>2</sup>CC) wie auch mit Flussverkettungen ( $\psi$ -VSP<sup>2</sup>CC), zeigen eine schnellere Stromsprungantwort als eine bewährte feldorientierte Regelung (FOC). Des Weiteren weist das Verfahren mit Flussverkettungen im Gegensatz zu dem Verfahren mit Induktivitäten weniger Oszillationen während des Einschwingvorgangs auf. Bei Stromsprungantworten größer des Nennstrom wird bei Verwendung der Flussverkettungen zusätzlich die Welligkeit des Stroms reduziert.

Für stationäre Zustände wird ebenso ein verbessertes Verhalten erzielt.  $\psi$ -VSP<sup>2</sup>CC schneidet bei der Betrachtung des THD-Wertes als Leistungsmaßstab besser ab als LVSP<sup>2</sup>CC, während es ähnliche Ergebnisse wie die konventionelle FOC-Regelung erzielt. Da die Regelung mit Motorinduktivitäten Sättigungs- und/oder Kreuzkopplungseffekte nicht berücksichtigt, wächst die Differenz des THD-Wertes zur Regelung mit Flussverkettungen bei steigenden Strömen an.

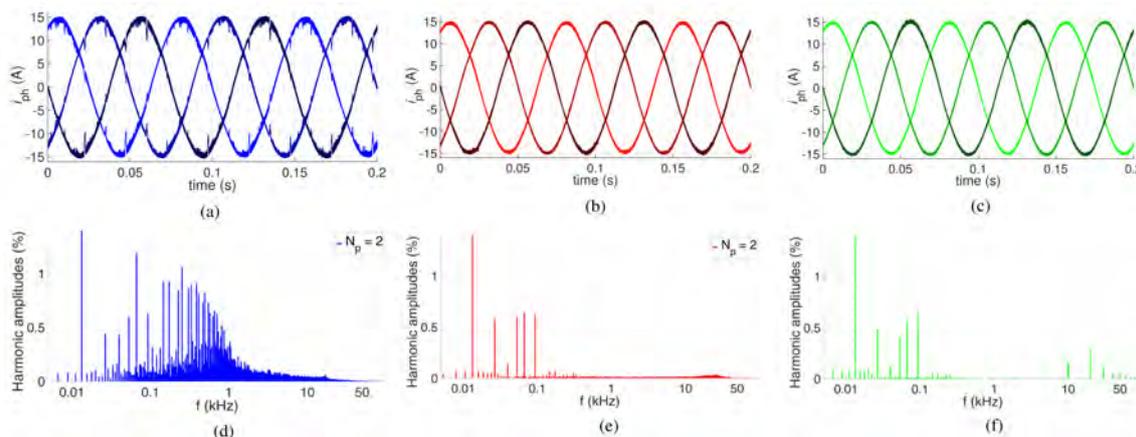


Abbildung 86: Statorstrom und Spektrum aller Phasen ( $i_d=-5A$ ,  $i_q=14A$ ,  $n_m=200rpm$ ) für L-VSP2CC (blau),  $\psi$ -VSP2CC (rot) und FOC (grün).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Vorhersagegenauigkeit und damit die Effektivität des implementierten MPC-Algorithmus deutlich verbessert wird, wenn die Flussverkettungen anstatt der Motorinduktivitäten als Berechnungsgrundlage verwendet werden. Dies zeigt sich besonders deutlich, wenn es sich um Maschinen mit ausgeprägten nichtlinearen Phänomenen wie Sättigung und Kreuzkopplung, z.B. hoch ausgelastete IPMSMs, handelt.

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 87, 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.

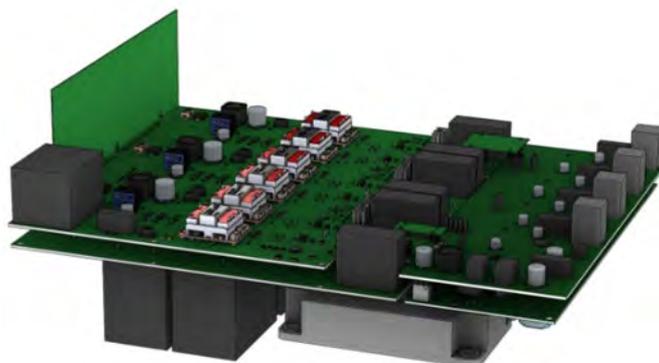


Abbildung 87: Dreiphasige Subeinheit des modularen Umrichters.

### 3.2 Kooperation im EnCN

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.

## Verbundforschungsprojekt 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.

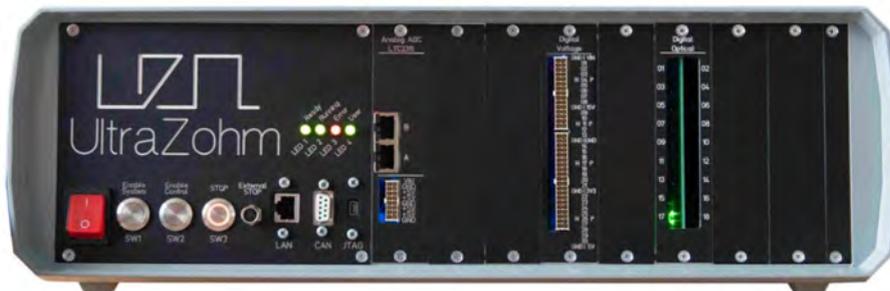


Abbildung 88: UltraZohm Echtzeit Berechnungsplattform.

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

## Förderprojekt 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 wird ein künstlich intelligentes Regelverfahren (KI) eingesetzt, 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 Frequenzrichter integriert werden kann und somit eine beschleunigte Markteinführung des Verfahrens ermöglicht. Im Projekt werden Kombination von maschinellem Lernen und modellprädiktiver Regelung untersucht.

## Förderprojekt 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 durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke machen innovative Lösungen notwendig, um die Frequenzstabilität 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 einem darauf angepasstem ultraschnellen elektrischen Kurzzeitspeicher in Form von Superkondensatoren. Superkondensatoren zeichnen sich durch die rein elektrostatische Energiespeicherung aus, wodurch es, im Gegensatz zu herkömmlichen Batteriespeichern, zu keiner signifikanten chemischen Alterung kommt. Folglich weisen Ultrakondensatoren eine deutlich höhere Zyklenfestigkeit und Leistungsdichte als Batterien auf. Dadurch sind sie sowohl für die Zwischenspeicherung von Energie aus wetterbedingten Leistungsfluktuationen der Photovoltaik im Sekunden- bis Minutenbereich als auch für die instantane Bereitstellung von Regelernergie zur Netzdienstleistung prädestiniert.

Im bisherigen Verlauf des Projekts wurden in Frage kommende leistungselektronische Topologien des Speichersystems ausgewählt, Simulationsmodelle erstellt und ein Prototypsystem geplant. Darauf aufbauend werden gegenwärtig geeignete Regelstrategien entwickelt und ihre Eignung für die Regelung der Energieflüsse im Speichersystem wird untersucht. Neben linearen Standardregelverfahren sollen im weiteren Verlauf nichtlineare Regler und modellprädiktive Regelverfahren für die Energieflussregelung untersucht werden.

## Förderprojekt Dependable Engine

Heutzutage gängige Wechselstrommotoren verwenden nahezu ausschließlich den Dreiphasenwechselstrom zur Erzeugung eines Drehfeldes. Das Konzept der Mehrphasenmaschinen, d.h. die Verwendung von mehr als einem Dreiphasenwicklungssystem gewinnt in den letzten Jahren an Fahrt. Ein großer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass bei Eintreten einer Hardwarestörung, z.B. dem Ausfall einer Phase, ein Totalausfall des Antriebsstrangs verhindert werden kann, indem der Fehlerfall detektiert und das Ansteuerverhalten dementsprechend angepasst wird. Zur Entwicklung eines solchen Systems, wurde im Dezember 2020 das Projekt Dependable Engine gestartet. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines zuverlässigen Antriebsstrangs, welcher bei dem Eintreten einer Hardwarestörung regelungstechnisch den Erhalt von 80% der Antriebsleistung gewährleisten soll. Das Steuer- und Regelsystem soll dabei anhand von detektierten Strangstromveränderungen eine Selbst-diagnose durchführen und angepasste Ansteuerungsveränderungen vornehmen. Das Institut ELSYS ist für die Steuerungsentwicklung sowie die Fehlererkennung zuständig, während die Firma Hans Mayer GmbH den Rotor, Stator und die Statorblechpakete eines neuen, mehrphasigen Motors entwickelt. Das Unternehmen UniTek GmbH entwickelt das Steuer- und Regelungssystem, welches die Ansteuerung der Hardwarekomponenten übernimmt.

## Förderprojekt HighTorqCraft

PMSM-Maschinen zeichnen sich durch eine hohe Effizienz, Dynamik, Leistungs- und Drehmomentdichte, kompakte Bauweise, geringes Gewicht und einem hohen Wirkungsgrad aus. Diesen erreichen sie bereits bei niedrigen Drehzahlen und Drehmomentbereichen. Aufgrund dessen wird die PMSM-Maschine bereits als Antrieb für (un)bemannte Flugdrohnen, wie zum Beispiel im Lilium Jet, VoloCity oder in fern- und selbstgesteuerten Drohnen in der Land- und Agrarwirtschaft, verwendet. Besonders für die Logistik- und Paktzustellung und den Personentransport werden effiziente, schallemissionsarme Maschinen benötigt. Die Maschinen müssen somit bei niedrigen Drehzahlen bereits ein hohes Drehmoment und eine hohe Leistung aufweisen. Hierfür wurde das Projekt HighTorqCraft am 15.07.2021 ins Leben gerufen. Ziel des Projekts ist es, bei niedrigen Drehzahlen die Drehmomentdichte, Effizienz, den Wirkungsgrad und das Wärmemanagement des elektrischen Antriebs zu erhöhen. Hierfür müssen die einzelnen Komponenten und Verlustanteile, wie zum Beispiel die Stromwärmeverluste in der Wicklung, Magnet-, Eisen- und Reibungsverluste betrachtet und gemäß den Anforderungen an die Applikation reduziert werden. Eine Reduktion von störenden Harmonischen Oberschwingungen, die Vibrationen, Geräusche und Drehmomentpulsationen hervorrufen können, wird ebenso betrachtet. Zur Realisierung der Ziele, werden unterschiedliche weichmagnetische Werkstoffe für das Statorblechpaket, optimierte Rotorstrukturen und Kühlsysteme untersucht. Das Projekt wird in Kooperation mit der Firma Hacker Motor GmbH durchgeführt.

### 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 90: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft (Auszug).

### 3.4 Personal

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerkonzepte sind aktuell sechs wissenschaftliche Mitarbeiter, fünf 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 Forschungs Kooperationen anzustoßen. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungs- sowie Industrieprojekte entstanden.

### 3.5 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 2022.

### 3.6 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. Im Juli 2021 wurde eine Kooperationsvereinbarung zwischen der Zohm Control GmbH und der TH Nürnberg unterzeichnet, die die Projekt-Ausgründung weiter unterstützt und der Zohm Control GmbH Räumlichkeiten an der TH Nürnberg zur Verfügung stellt.



Abbildung 91: Gründerteam der Zohm Control GmbH. 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. N. Adamchuk, M.Sc. D. Wagner, M.Sc. K. Zacharias

### 4.1 Einleitung und Motivation

Durch die angestrebte Klimaneutralität ergeben sich für viele Industriebetriebe in Deutschland enorme Herausforderungen. Insbesondere energieintensive Industrien zeigen großes Optimierungspotential und stehen vor der Aufgabe der Energieeinsparung und Verminderung des Einsatzes fossiler Energieträger. Mit einer Jahresemission von 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente, einem Strombedarf von 6 TWh und einem Gesamtenergiebedarf von 13 TWh hat die deutsche Gießereiindustrie erheblichen Anteil in der energieintensiven Industrie. Die Gießereiindustrie trägt mit ca. 75.200 beschäftigten Mitarbeitern zu einer beträchtlichen volkswirtschaftlichen Wertschöpfung bei und sichert die technologische Kompetenz ganz unterschiedlicher Industriezweige. Eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung in Gießereien wird als anspruchsvoll, aber, unter Berücksichtigung des hohen Energiebedarfs dieser Industrie, auch sehr relevant angesehen. Insbesondere die rigiden Vorgaben der Fahrzeughersteller bezüglich einer CO<sub>2</sub>-reduzierten Fertigung ihrer Erzeugnisse stellen die Gießereien vor große Herausforderungen. Die Möglichkeiten für eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen in einer erhöhten Energieeffizienz, der Nutzung regenerativer Energiequellen sowie dem Effekt von Smart Production durch eine verstärkte Digitalisierung.



Abbildung 92: Energieintensiver Prozess in einem Gussbetrieb

Im Projekt User Interface Design von Energiedaten im Forschungsbereich EFFIZIENZ wird über verschiedene Digitalisierungsansätze die Branche bei dem notwendigen Transformationsprozess unterstützt. 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, wie sie beispielsweise bei Windkraftanlagen zum Einsatz kommen.

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

### 4.2 Energiekennzahlen für Aluminium-Gussbetriebe

Die Anwendung von Kennzahlen kann in dem komplexen Betriebsablauf eines Aluminium-Gussbetriebes für eine höhere Transparenz der Daten sorgen und somit eine produktivere und energieeffizientere Betriebsweise von Schmelzöfen und Druckgussmaschinen ermöglichen. Durch die Analyse der innerbetrieblichen Lieferkette des Flüssigaluminiums konnte die Kennzahl Speicherverhältnis entwickelt werden, welche das Verhältnis des Flüssigaluminiumangebots zum prognostizierten Verbrauch angibt und damit die Versorgungslage charakterisiert.

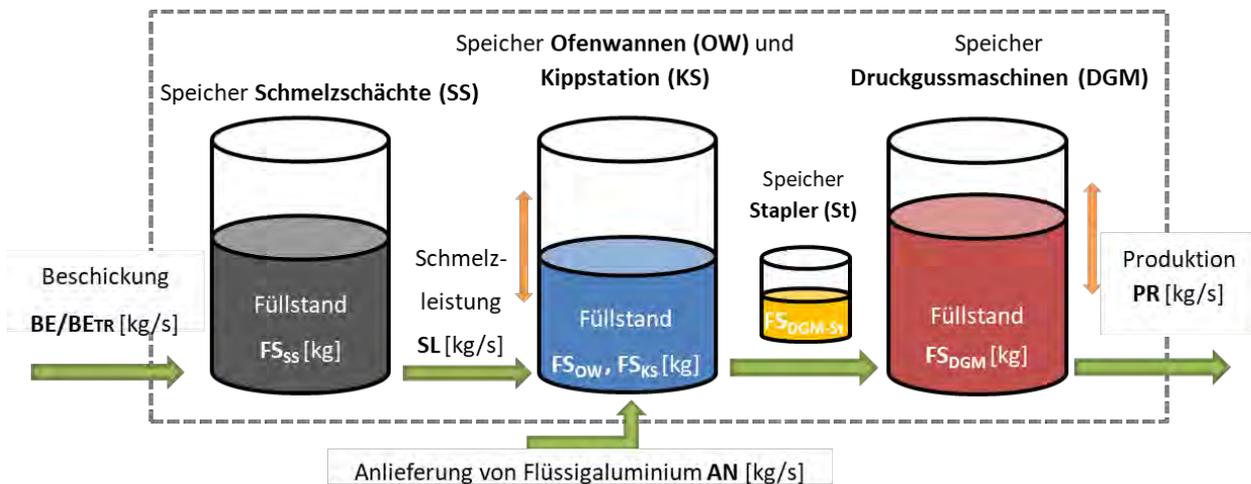


Abbildung 93: Materialversorgung in einem Aluminium-Druckgussbetrieb

Damit können Betriebszeiten identifiziert werden, in welchen genug Flüssigaluminium vorhanden ist (Unterlast), um Energieeffizienzmaßnahmen zu realisieren und Betriebszeiten, in denen die Sicherstellung der Produktion absoluten Vorrang hat (Überlast). Die Kennzahl ermöglicht es, schnell kritische Betriebszustände zu erkennen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

BZ <sub>DGM</sub> \ BZ <sub>so</sub>	++	+	0	-	--
++	UL	UL-NL	NL	N-ÜL	ÜL
+	UL-NL	NL	NL-ÜL	ÜL	ÜL
0	NL	NL-ÜL	ÜL	ÜL	ÜL
-	NL-ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL
--	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL

UL	Unterlast
UL-NL	Übergangsbereich Normallast zu Unterlast
NL	Normallast
ÜL-NL	Übergangsbereich Überlast zu Normallast
ÜL	Überlast

Bewertungskriterium (Grenzen) → Lastfall

Abbildung 94: Innerbetriebliche Lieferkette / Kennzahl Speicherverhältnis

Für die Bestimmung der Kennzahl ist die Auswertung von Produktionsdaten und von Füllständen der Flüssigaluminiumspeicher notwendig, welche in realen Betrieben jedoch nur fallweise erfasst werden. Aus der Betriebsanalyse von drei Kooperationspartnern unterschiedlicher Größe konnten diesbezüglich drei verschiedene Automatisierungsgrade spezifiziert werden: Während bei einem kleinen mittelständischen Unternehmen keine Sensorik zur Bestimmung der Füllstände vorhanden war, wurden bei einem größeren mittelständischen Kooperationspartner nur die Füllstände der Schmelzöfen erfasst und in eine zentrale Datenbank geschrieben. Den höchsten Automatisierungsgrad besaß ein weltweit aktiver großer Zulieferer für die Automobilindustrie, welcher die notwendigen Daten über ein Web Service zur Verfügung stellen konnte.

### 4.3 Prozessmonitoring und digitale Störfallanalyse

Bei der Betrachtung von verschiedenen mittelständischen Gießereien durch das Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz (KIEff) der Hochschule Ansbach zeigt sich ein oftmals niedriger Digitalisierungsgrad. Es 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.

Im Jahr 2016 startete die Zusammenarbeit von pressmetall Gunzenhausen GmbH und dem Forschungsinstitut KIEff der Hochschule Ansbach, um ein digitales Abbild der Produktion im Schmelz und Druckgussbetrieb zu schaffen. In der ersten Phase des Projektes wurden alle anfallenden Maschinendaten in einer zentralen Datenbank erfasst. Die Maschinendaten liegen jeweils in verschiedenen Dateiformaten auf den Maschinenrechnern vor und weisen hinsichtlich Konsistenz, Redundanzfreiheit, Relevanz, Verständlichkeit und Verfügbarkeit eine niedrige Datenqualität auf. Neben den Maschinendaten an den Maschinenrechnern werden die Auftragsdaten in einen ERP-System hinterlegt. Für die zentrale und strukturierte Datenerfassung bei pressmetall Gunzenhausen wurde das Softwaretool PMGConnect entwickelt, welches auf die Maschinenrechner sowie das ERP-System zugreift. Die Software sammelt die verfügbaren Daten und hinterlegt diese systematisch und einheitlich in einer MySQL-Datenbank. Neben der Datenerfassung wurde das Tool PMGOnline zur Online-Visualisierung der Maschinendaten entwickelt (siehe Abbildung 95). Ein wesentlicher Vorteil der Visualisierungssoftware ist, dass diese aufgrund der Betriebsunabhängigkeit auch in weiteren Betrieben eingesetzt werden kann. Lediglich die zentrale Datenerfassung muss für jedes Unternehmen spezifisch implementiert werden. Ein weiterer Vorteil der Software ist die vom Nutzer flexibel konfigurierbare Ansicht. Die verfügbaren Ansichten umfassen unter anderem eine Gesamtansicht des Betriebes, ein Dashboard für die Druckgussmaschinen, die Anzeige der Prozessstabilität der Druckgussmaschinen sowie eine Übersicht über produktionsbezogene Kennzahlen der Maschinen.

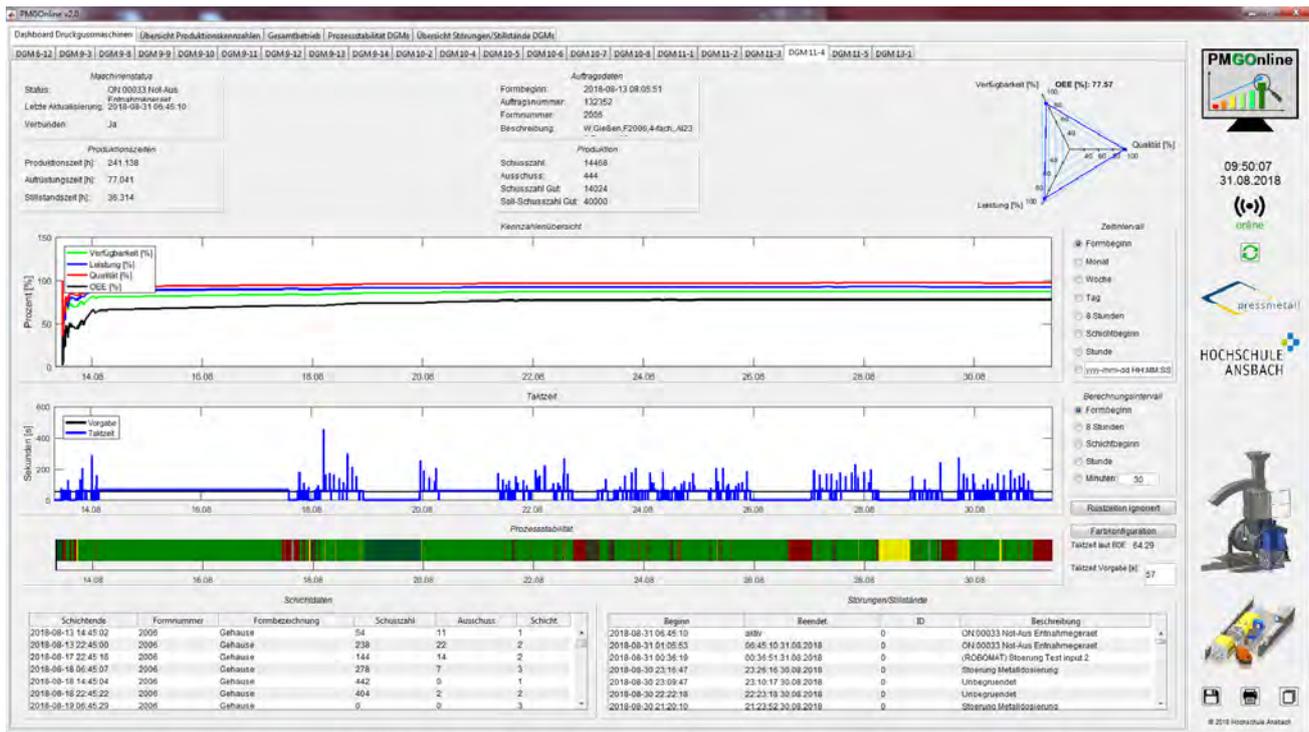


Abbildung 95: Dashboard des Prozessmonitoring-Systems

Das Softwaretool für die Online-Visualisierung ist aktuell auf den Arbeitsplatzrechnern des Gießereileiters, des Schmelzleiters, der Prozesstechnologen, der Staplerfahrer sowie der Instandhaltung und bei weiterem Produktionspersonal installiert. Die Software wird als ergänzende Informationsquelle sowie als Unterstützung bei Entscheidungen genutzt. Zudem wird das Tool bei der Schichtbesprechung, die vor jeder Schicht in einer großen Gruppe in einem Besprechungsraum stattfindet, zur Produktionsplanung verwendet. Somit zeigt sich hier bereits eine wesentliche Verbesserung zum vorherigen Stand, bei dem Kennzahlen noch händisch berechnet wurden. Insbesondere konnte auch die Akzeptanz der Mitarbeiter für Digitalisierungslösungen verbessert werden. Der Wunsch nach einer Möglichkeit der Analyse von Störfällen sowie nach der mobilen Verwendbarkeit des Monitoringsystems gab den Anstoß für die Entwicklung weiterer Softwarefunktionalitäten.

Während der Fokus der Online-Visualisierung auf den aktuellen Maschinendaten liegt, wird für die Störfallanalyse ein weiteres Modul benötigt, um die historischen Daten auszuwerten. Der modulare Aufbau der Software sorgt für eine größere Stabilität und eine höhere Benutzerfreundlichkeit. Bei der Auswertung der historischen Maschinendaten liegt der Fokus auf den Störfällen der Druckgussmaschinen, da diese wesentlich die Effizienz der Produktion und die Qualität der Gussbauteile beeinflussen. Für die Analyse wurde die Software DownTime-Explorer entwickelt, welche wie das Prozessmonitoring-System PMGOnline auf die von PMGConnect erstellte zentrale Datenbank 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. Für die Auswertung kann ein beliebiger Zeitraum ausgewählt werden. Das Tool analysiert anschließend die Daten und stellt die Informationen in verschiedenen Ansichten bereit. So können zum Beispiel die Fehler nach Störungsdauer und Störungstyp den Maschinen zugeordnet werden und in einem Balkendiagramm dargestellt werden. Eine weitere Ansicht visualisiert die jeweiligen Störungen der Maschinen in einem Zeitstrahl. Auch eine Auswertung in Abhängigkeit der Gussform wird durch die Software ermöglicht.

Um das Monitoring im Betrieb zu optimieren und auf mobile Verwendbarkeit zu erweitern, wurde eine webbasierte Lösung angestrebt. Der wesentliche Vorteil eines webbasierten Systems ist die Anwendung auf Smart Devices wie Smartphones und Tablets, welche die Nutzer mobil verwenden können. Um die gewünschte Verbesserung der Softwareperformance zu gewährleisten, wird die Visualisierung von der Datenverwaltung und den Berechnungen entkoppelt. Das System wird hierzu in Module, welche Kennzahlen berechnen, eine Web API, welche die Datenverwaltung organisiert, und in ein WebGUI, welche die Informationen im Browser visualisiert, getrennt. Somit wird

auch eine weitere Verbesserung der Softwarestabilität zum bisherigen System erreicht. Ein zusätzlicher Vorteil der Web-Lösung ist, dass die Software nicht installiert werden muss, sondern jedem Mitarbeiter über ein internetfähiges Gerät mit einem Browser zur Verfügung steht. Als Datenquelle wird erneut die von PMGConnect erzeugte zentrale Datenbank verwendet. Spezielle Berechnungsmodule greifen auf diese Daten zu, berechnen Kennzahlen und speichern diese mit Hilfe der Web API in einer Cloud-Datenbank ab. Die WebGUI ist als Single-Page-Applikation implementiert und visualisiert anschließend diese Daten. Die Visualisierungssoftware verfügt über Ansichten der Gesamtanlageneffektivität (OEE), der Störungen sowie der Verfügbarkeit der Druckgussmaschinen.



*Abbildung 96: Webbasiertes Prozessmonitoring-System im industriellen Einsatz*

Die Bedeutung der entwickelten Anwendungen wurden in verschiedenen Vorträgen auf Veranstaltungen des Bundesverbandes der Deutschen Gießereiunternehmen in die Branche hinein kommuniziert. Die Erfahrungen bei der Umsetzung fließen auch in die Arbeit des Projektleiters Prof. Dr. Wolfgang Schlüter im Arbeitskreis 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. In einer von der HS Ansbach koordinierten Arbeitsgruppe mit u. a. der Daimler AG wird ergänzend zum *BDG-Kompass* an einer Qualifizierungsmatrix gearbeitet, um Empfehlungsrichtlinien für Bildungsträger zum Thema Digitalisierung in der Gießerei zu erstellen.

#### **4.4 Energieeffiziente Betriebsoptimierung durch Simulation**

Im Rahmen des Green Factory Bavaria-Projektes E|Melt wurde ein hybrides Simulationsmodell, welches den Materialfluss des Gesamtbetriebes und den Energieverbrauch der Schmelzöfen abbildet, entwickelt und anhand von realen Produktionsdaten validiert. Die Software wurde hierbei so konzipiert, dass beliebige Betriebe abgebildet werden können. Über eine Anlagenkonfiguration, welche die Betriebsstruktur und die Anzahl der produzierenden Druckgussmaschinen, der Schmelzöfen und der Transportstapler beinhaltet, werden die betriebspezifischen Simulationsmodelle generiert. Mithilfe des Materialflussmodells wird der komplette Materialfluss innerhalb des Werks erfasst. Dieses ist mit einem Energieflussmodell gekoppelt, welches die thermodynamischen Vorgänge der Aluminiumschmelzöfen abbildet. Mit Hilfe der entwickelten Simulation lassen sich Energieeffizienzmaßnahmen an spezifischen Betrieben simulativ untersuchen, ohne den realen Betrieb zu beeinträchtigen. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern ein Online-Demonstrator erstellt. Der Demonstrator ist unter <https://www.hs-ansbach.de/emelt> frei verfügbar. Mit diesem kann die Wirksamkeit der Energieeffizienzmaßnahmen für drei typische Betriebe verschiedener Größe aufgezeigt werden.



*Abbildung 97: Analyse von Energieeffizienz-Maßnahmen anhand des E|Melt -Demonstrators*

In aktuellen Forschungsarbeiten wird die Kopplung der hybriden Material- und Energieflusssimulation mit Optimierungsalgorithmen untersucht. In einem Optimierungsmodell ist das Ziel, die Verteilung des Flüssigaluminiums auf die Druckgussmaschinen zu optimieren, um die warmzuhaltende Aluminiummasse in den Dosieröfen zu reduzieren. Im Modell wird bestimmt, wann welche Druckgussmaschine optimal zu beliefern ist. Hierfür wird eine dynamische Optimierung verwendet, welche alle betrachteten Zeitpunkte in einem Gleichungssystem berücksichtigt. Die optimalen Belieferungszeiten werden anschließend als Eingangsgröße der hybriden Simulation verwendet, welche den Einfluss der Optimierung analysieren kann. 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 lässt sich dann die erzielbare Energieeinsparung genauer quantifizieren.

In einer weiteren Arbeit wurde das Simulationsmodell mit einem Optimierungsmodul verknüpft, welche geeignete Ofenreinigungszeiten der Schmelzöfen für einen störungsfreien und energieeffizienten Betrieb ermittelt. Die Optimierung übergibt Reinigungszeiten an die Simulation und erhält von der Simulation eine aus gewichteten Teilzielen bestehende Zielfunktion zurück, welche im Rahmen der Optimierung minimiert wird. Für die multikriterielle simulationsbasierte Optimierung werden unterschiedliche Algorithmen, wie z. B. der genetische Algorithmus getestet. Es zeigt sich, dass der genetische Algorithmus für dieses Optimierungsproblem geeignet ist. Durch die Optimierung können in kritischen Betriebsituationen zum einen Betriebsstörungen vermieden werden, zum anderen hat die richtige Wahl der Ofenreinigungszeitpunkte bei hoher Materialnachfrage einen erhöhten Einfluss auf die Energieeffizienz.

## 4.5 Energieeffizienz durch Abwärmeverstromung

Das technisch-wirtschaftliche Potential der Abwärmenutzung 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 98).

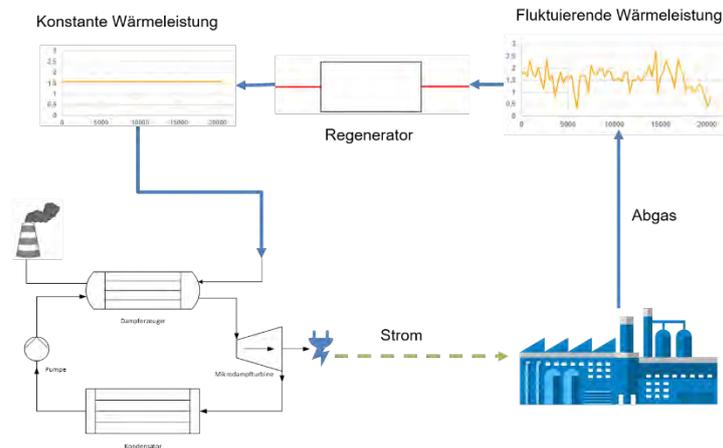


Abbildung 98: Anlagenkonzept zur Abwärmeverstromung bei fluktuierender Wärmeleistung

Das Anlagenkonzept erfordert die Entwicklung eines geeigneten Hochtemperatur-Wärmespeichers und einer komplexen Regelungsstrategie. Ein sensibles Wärmespeicherverfahren in einem festen Material wurde in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren ausgewählt. Der Wärmespeicher besteht aus einem Block aus festem Material mit regelmäßigen Kanälen gleichen Durchmessers, durch die das Abgas strömen kann. Enthält das Abgas überschüssige Energie, wird der Regenerator aufgeladen und das heiße Abgas strömt durch die Regenerator-Säule und gibt dabei seine thermische Energie an diese ab. Wenn die Leistung des Abgases gering ist, wird der Regenerator entladen und kalte Luft durch die Regenerator-Säule geleitet, die ihre Wärme wieder an die Luft abgibt. Aus verfahrenstechnischen Gründen soll die Abwärme in zwei Regeneratoren gespeichert und entladen werden (Abbildung 99).

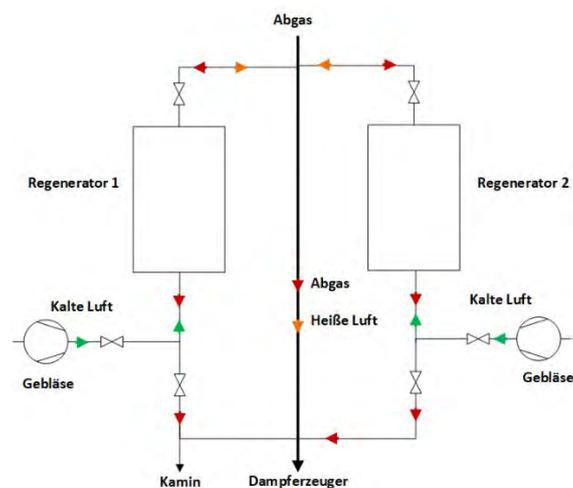


Abbildung 99: Verfahrenstechnisches Anlagenschema

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 99 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 so auslegen, dass starke Schwankungen in der Wärmeleistung ausgeglichen werden können, ohne dass die Regeneratoren überdimensioniert sind (Abbildung 100).

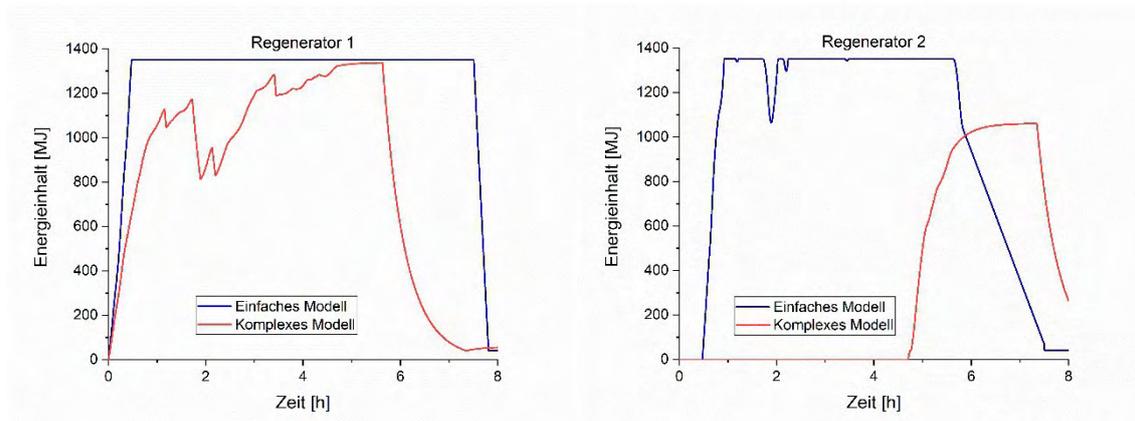


Abbildung 100: Vergleich des Energiegehalts der Regeneratoren über ein einfaches Speichermodell und über ein komplexes thermodynamisches Modell ermittelt

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 Dampferzeuger als auch für die Regeneratoren ein Reinigungskonzept erforderlich macht.

Der durch die Mikrodampfturbine erzeugte Strom kann entweder zur Eigenstromnutzung verwendet oder in das Netz eingespeist werden. Das finanzielle Einsparpotential durch die Stromerzeugung und die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Footprints sind, wie Beispielrechnungen zeigen, beachtlich. Nach konservativen Berechnungen kann für jeden Schmelzofen eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von etwa 15 % erzielt und damit der CO<sub>2</sub>-Ausstoß von energieintensiven Gießereien erheblich reduziert werden.

## 4.6 Digitale Prozesskette zur numerischen Auslegung von Gussbauteilen

Das Ziel des Projektes "Durchgängige numerische Auslegung von Gussbauteilen entlang der Prozesskette" (kurz DNAguss) ist die Kopplung von bisher unverbundenen Softwaredisziplinen in der Gießereiindustrie. Dies ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Entwicklung von höchst leistungsfähigen Gussbauteilen für die Windenergiebranche, den Großmaschinenbau sowie kleineren, in Serienfertigung hergestellten Gussbauteilen.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des 7. Energieforschungsprogrammes gefördert. An dem Projekt unter Leitung des Fraunhofer-Institutes für Betriebsfestigkeit LBF arbeiten neben dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS verschiedene Softwareanbieter mit. Die Aufgabe der Hochschule Ansbach besteht in der Konzeption und Implementierung fehlender Schnittstellen zwischen den Softwarepaketen als notwendige Voraussetzung für die Realisierung der numerischen Prozesskette.

### 4.6.1 Digitale Prozesskette

Die Prozesskette umfasst ein CAD-Tool zur Geometrieonstruktion, eine Materialsimulation mit einer Material-Datenbank, die Gießprozesssimulation und die Strukturanalyse sowie verschiedene Postprozessoren. Zu der letzten Kategorie gehören Softwaretools für die Lebensdaueranalyse und die zerstörungsfreie Prüfung (ZFP). Die Abbildung 101

zeigt die in dem Projekt konzipierte numerische Prozesskette mit den benutzten Softwaretools und den zu übertragenen Informationen.

Der Informationsfluss in der Prozesskette beginnt mit der Erstellung einer 3D-CAD-Zeichnung des Bauteils. Im Anschluss wird das Modell zur Weiterentwicklung in die CAE-Werkzeuge – die Gießprozesssimulation und die Strukturanalyse – übertragen. Ein weiteres konzeptionelles Element ist die Materialsimulation, die temperaturabhängige globalen Materialeigenschaften ermittelt und die Ergebnisse in einer Datenbank speichert. Aus der Datenbank können die benötigten physikalischen Größen nach einer entsprechenden Konvertierung in die Strukturanalyse, die Gießprozesssimulation und die Postprozessoren übertragen werden.

Die Strukturanalyse und die Gießprozesssimulation generieren aus den CAD-Modellen automatisiert Volumennetze für das numerische Lösen der Prozessgleichungen und vervollständigen das physikalische Modell mit den Materialeigenschaften. Mithilfe des Gießprozesssimulationstools wird die Formfüllung und den Erstarrungsprozess numerisch untersucht. Die Formfüllung beschreibt den Vorgang, wie das flüssige Metall in die Form eindringt. Eine weitere Funktion der Gießprozesssimulation – die Erstarrungsberechnung – beschreibt die Verteilung der unerwünschten Porositäten sowie weiterer physikalischer Größen wie die lokalen Dichten und die Eigenspannungen im flüssigen Guss bis zur Erstarrung. Die lokalen Dichten und Eigenspannungen werden von der FEM-basierten Strukturanalyse als Eingangsparameter benötigt. Dazu werden die Ergebnisse des Gießprozesssimulationstools auf das FEM-Netz übertragen.

Unter Berücksichtigung von Betriebslasten führt die Strukturanalyse Berechnungen durch, um Spannungen am Bauteil unter Belastungszuständen festzustellen. Die Topologieoptimierung als Bestandteil der Strukturanalyse trägt in der Prozesskette dazu bei, den Materialverbrauch zu minimieren.

Die zwei Postprozessoren in der Prozesskette sind die Simulation zur zerstörungsfreien Prüfung (ZFP) und das Lebensdaueranalysetool. Die ZFP unterstützt die Gussbauteilentwicklung durch die Testverfahren zur Identifikation und Charakterisierung von Materialfehlern auf der Oberfläche oder auch im Innern des Prüflings, ohne die Probe beim Versuch zu beschädigen. Die in DNAGuss erfolgte Entwicklung einer ZFP-Simulation ermöglicht, die Anwendung verschiedener Testverfahren (Röntgenprüfung, Ultraschallprüfung, magnetische Prüfungen) pro Bauteilregion virtuell zu untersuchen. Nach einer derartigen Simulation entsteht eine Punktwolke, wobei jeder Punkt eine FEM-Einheit (Knoten/Element) darstellt. Die Farbe eines Punktes signalisiert die Anwendbarkeit eines Testverfahrens: grün – anwendbar, rot – nicht anwendbar, gelb – bedingt anwendbar (zum Beispiel: ein Bereich ist nur bei einer bestimmten Prüfkörpergröße prüfbar) (s. Abbildung 101, rechts unten).

Ein weiterer Postprozessor, das Lebensdaueranalyse-Werkzeug, untersucht die Lebensdauer des Bauteils und bestimmt lokale Sicherheitsfaktoren. Als interner Zwischenschritt dient die Bestimmung der lokalen Wöhlerlinien, die die Summe der ertragbaren Lastwechsel bis zum Bruch des Materials beschreiben.

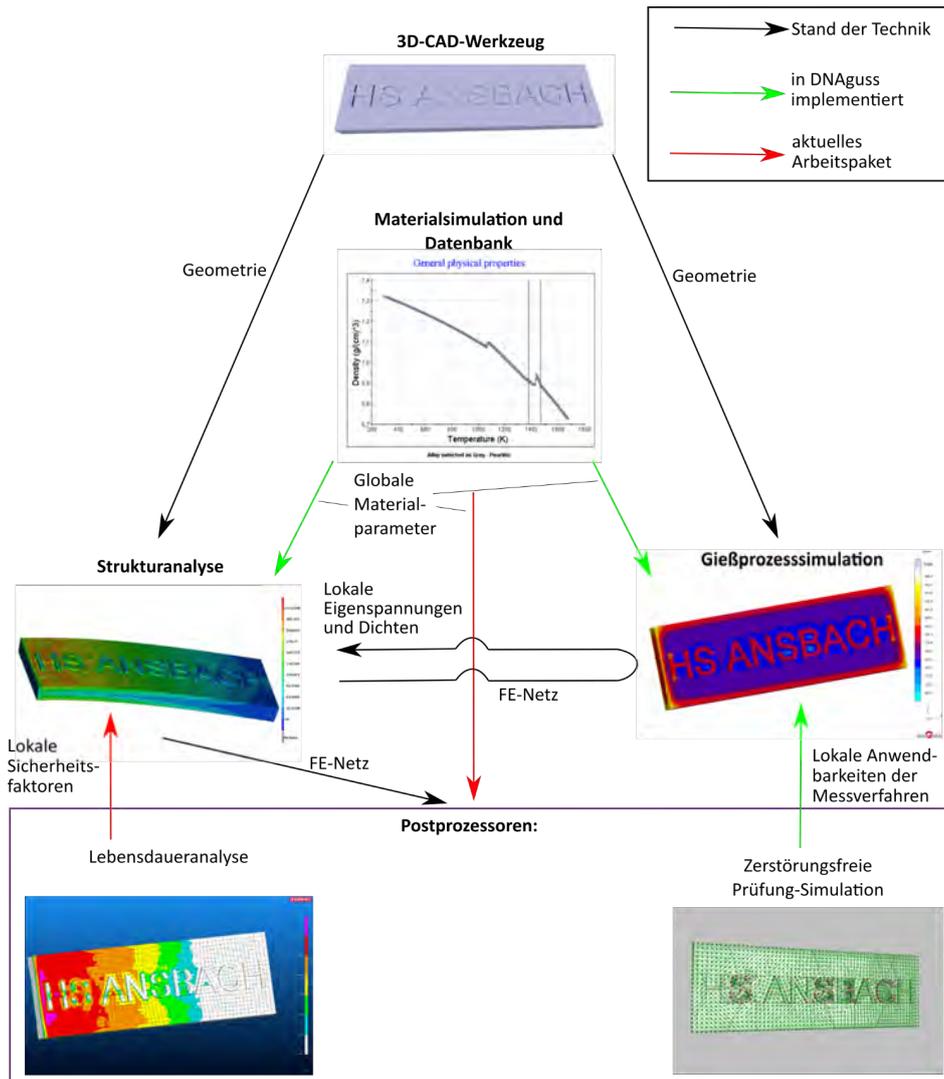


Abbildung 101: Prozesskette in der Gussindustrie

#### 4.6.2 Schnittstellen

Durch die Anwendung der Simulationswerkzeuge in der Konstruktionspraxis entsteht Daten, die aktuell nur einzeln im jeweiligen Entwicklungsschritt betrachtet werden. Zum Beispiel beinhaltet die Materialdatenbank über 50 temperaturabhängige Materialparameter, die von anderen Simulationswerkzeugen zum Modellaufbau benötigt werden. Da keine notwendigen Datenschnittstellen vorhanden waren, wurde auf der Grundlage der Erweiterten Backus-Naur Form (EBNF) ein allgemeiner Ansatz zur Programmierung der fehlenden Schnittstellen gewählt (s. Abbildung 102).

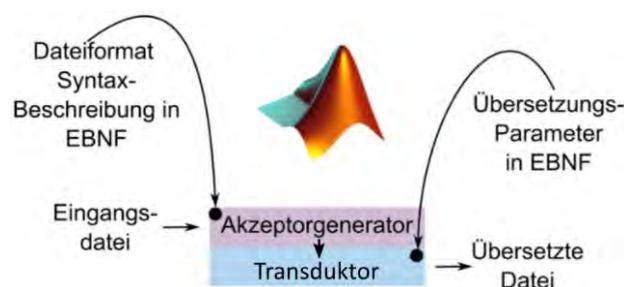


Abbildung 102: Akzeptor- bzw. Transduktorgenerator

Im ersten Schritt wurden die formale Beschreibung für das Dateiformat der Materialdatenbank -\*.json - mit Hilfe von EBNF geschrieben. Auf dieser Basis kann eine \*.json-Eingangsdatei im Akzeptorgenerator auf Beschädigung überprüft werden. Im zweiten Schritt wurde der Akzeptorgenerator um eine weitere Funktionalität erweitert, der Konvertierung des Dateiformats im Transduktor. Der Transduktor benötigt zusätzlich nur die Informationen, welche Parameter in welches Format übersetzt werden sollen. Akzeptor- und Transduktorgenerator sind im Softwarepaket MATLAB realisiert. Mithilfe dieses Ansatzes wurden die benötigten Schnittstellen (Materialbank – Strukturanalyse, Materialdatenbank - Gießprozesssimulation) implementiert. Versehen mit einer grafischen Benutzeroberfläche steht mit dem DNAGuss-Konverter ein einfach bedienbares Konvertierungstool zur Verfügung.

Eine weitere nichtvorhandene Schnittstelle ist die zwischen Materialdatenbank und Lebensdaueranalyse. Bei der Entwicklung dieser Schnittstelle wird versucht, vorhandene experimentellen Daten in die numerische Prozesskette einzubeziehen. Aktuell generiert die Lebensdaueranalyse in einem softwareinternen Zwischenschritt die Wöhlerlinien anhand der lokalen Festigkeitswerte (E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit). Die neue Methode ermöglicht die direkte Nutzung von experimentellen Wöhlerlinien mithilfe der Ergebnisse von anderen Softwaretools der Prozesskette. Damit kann die Genauigkeit der Lebensdauerbestimmung erhöht werden.

## 4.7 Technologietransfer

Die Ergebnisse im Teilprojekt User Interface Design werden vor allem durch den Bundesverband der Deutschen Gießereiunternehmen (BDG) in der Branche bekannt gemacht. Auf zahlreichen Fachausschusssitzungen und Veranstaltungen wie dem Deutschen Gießereitag nutzt das KIEff die Möglichkeit, aktuelle Forschungsergebnisse einem Fachpublikum zu präsentieren. Durch die Mitarbeit von Prof. Schlüter im Arbeitskreis Gießerei 4.0 des BDG und der gemeinsamen Erarbeitung des BDG Kompass - Gießerei 4.0 haben sich zahlreiche Industriekontakte beispielsweise zum Gießereibereich der Daimler AG oder der Volkswagen AG ergeben. Auf der Basis dieser Kontakte wurde, mit Unterstützung des LS Fertigungsautomatisierung und Produktionssysteme (FABS) von Prof. Franke (FAU), die *Fachtagung Digitalisierung in der Gießereiindustrie* am 9. und 10. Oktober 2019 auf dem Energie Campus Nürnberg abgehalten. Im Fokus standen die Zukunftsperspektiven der in starker internationaler Konkurrenz stehende Branche anhand der Leitfragen:

- Wie sieht die Gießereiindustrie der Zukunft aus?
- Kann die Produktion durch intelligente Wertschöpfung gesteigert werden?
- Wie flexibel kann Prozessmanagement durch Smart Data gestaltet werden?

Dazu stellte der Tagungsleiter Prof. Dr. Schlüter die im Forschungsbereich EFFIZIENZ erarbeitete Roadmap zur Digitalisierung vor. In einem Nachbericht wurde die Tagung in der international renommierten Online-Publikation SPOTLIGHTMETAL ausführlich besprochen.

Das KIEFF nahm 2020 zum dritten Mal an der größten europäischen Druckgussmesse in Nürnberg EUROGUSS 2020 teil. Auf dem Gemeinschaftsstand *Forschung, die Wissen schaf(f)t* wurden die Forschungsergebnisse einem internationalen Fachpublikum präsentiert. In einer interaktiven Präsentation zeigte das KIEff der Hochschule Ansbach seine Forschungsergebnisse unter dem Motto Energieeffizienz durch Digitalisierung. 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 103: Messestand auf der EUROGUSS 2020 (links) / Fachtagung Digitalisierung in der Gießereiindustrie (rechts)*

Durch fortlaufende Veröffentlichungen in der führenden deutschsprachigen Fachzeitschrift GIESSEREI, in der internationalen Fachzeitschrift *Casting Plant and Technology International* und dem Online-Magazin *SpotLightMetal* ist das KIEff mit seinen Forschungsarbeiten in Fachkreisen präsent und zu einem festen Bestandteil in verschiedenen Forschungsnetzwerken geworden.

#### **4.8 Ausblick**

Die angestrebte CO<sub>2</sub>-Neutralität Deutschlands bis 2040 ist gerade für die energieintensiven, zumeist mittelständischen Unternehmen in der Gießereibranche eine große Herausforderung. Die geschilderten Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz sind hier wichtige Maßnahmen, die durch weitere Forschungsanstrengungen intensiviert werden.

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. Die gewöhnliche statistische Datenauswertung kann mit Methoden der Mustererkennung erweitert werden, um datengetriebene Modelle zu entwickeln, mit denen das Betriebsverhalten prognostiziert werden kann. Dadurch können Wartungsprognosen von den Produktionsmaschinen (Predictive Maintenance) sowie Vorhersagen über die Qualität der gefertigten Produkte (Predictive Quality) 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, um damit eine Referenz für die gesamte Branche zu schaffen. Durch Gespräche mit Komponentenanbietern, simulative Untersuchungen des Druckverlustes und Messungen in der Abgasführung wurde der Bau und Betrieb einer derartigen Demonstrationsanlage vorbereitet.

Mit dem im DNAguss-Projekt entwickelten Konvertierungstool wird die Kopplung von verschiedenen Softwaretools für die Konstruktion insbesondere von großen Gussteilen ermöglicht. Durch Einbindung von Lebensdaueranalyse und ZFP-Prüfung lassen sich Bauteil- und Prozessentwicklung mit Auswirkungen auf die Material- und Energieeffizienz optimieren.

Neben diesen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der aktuell gegebenen Rahmenbedingungen sind weitere Projekte geplant, die die zukünftigen, sich dynamisch entwickelnden Anforderungen im Energiesektor berücksichtigen. So soll in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Gießereitechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg der Einsatz regenerativer Energiespeicher wie grüner Wasserstoff zur Pufferung von Stromlastspitzen untersucht werden. In einem weiteren geplanten Projekt mit der Arbeitsgruppe Energiemarktdesign der FAU und der Arbeitsgruppe Gebäudeintegration in zukünftige Energienetze der TH Nürnberg stehen Anpassungs- und Flexibilisierungsstrategien für energieintensive Industrieunternehmen auf dem Weg zur Klimaneutralität im Fokus.

## 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 - Energiespeicherhäuser“ angesehen werden, das jetzt mit dem Folgeprojekt „Herzo Opt“ in ein Langzeitmonitoring übergegangen ist. Die Arbeitsgruppe war auch im Jahr 2021 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 31.12.2021 insgesamt 11.203.240 €. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und in neue Laborausstattung investiert werden. Die Arbeitsgruppe bestand im Berichtszeitraum aus 43 Mitarbeitern zuzüglich der 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 erfolgreich eingeworbenen Drittmitteln für den Strukturaufbau der TH Nürnberg im EnCN gelang der Arbeitsgruppe die Inbetriebnahme eines Sekretariats mit einer halbtägigen Teamassistenten 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. Aus der Arbeitsgruppe „EFFIZIENZ“ haben im Förderzeitraum von 2017 bis 2021 insgesamt 21 Doktoranden ihre Promotionsarbeit begonnen oder bereits erfolgreich abgeschlossen.

Sowohl die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“ als auch die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Industrie“ haben erfolversprechende Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt und bauen diese weiter aus.

## 6 Vorträge & Poster

- [1] Betzold, C., 2021. Group of eight buildings with low temperature heating grid. Workshop IEA HPT Annex 49 of 13<sup>th</sup> International Heat Pump Conference 2020, April 26th, 2021, Jeju, Korea.
- [2] G. Grün: Sensoranwendungen im Gebäude. Sicher vom Sensor in die Cloud. Leistungszentrum sichere vernetzte Systeme, München, 19.6.2018.
- [3] G. Grün: Building Integrated Photovoltaics in Modular Façade Constructions. ISEnEC, Nürnberg, 17.-18.7.2018.
- [4] G. Kontes: Data-driven approach for robust supervisory control in buildings. ISEnEC, Nürnberg, 17.-18.7.2018.
- [5] G. Grün: Aktivierung der Gebäudehülle und Optimierung des Raumklimas im Rahmen von Umnutzungs- oder Sanierungsmaßnahmen. Bayern innovativ Cluster-Forum Gebäude – Energieeffizienz, Nürnberg, 11.10.2018.
- [6] G. Grün: Die Fassade der Zukunft: VHF - multifunktional und intelligent, Podiumsdiskussion Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. und Bundesstiftung Baukultur, München, 16.1.2019.
- [7] G. Grün: Fassadenintegrierte PV, FVHF Impulse für Partnerschaften "Zwei", Valley, 7.5.2019.
- [8] G. Grün: Rahmenbedingungen für Smarte Gebäude, Berliner Energietage 2019, Berlin, 21.5.2019.
- [9] G. Grün: Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor: Technische und wirtschaftliche Herausforderung, München, 18.9.2019.
- [10] G. Grün: Development of Energy Efficiency in the Building Sector in Germany and its Contribution towards a Carbon Neutral Building Stock, Dalian, 14.10.2019.
- [11] G. Grün, H. Will: Energieeffiziente Modernisierung & Serielles Sanieren, Berliner Energietage 2020 – Digitaler Sommer der Energiewende, 26.5.2020.
- [12] G. Grün: Energy Efficiency Measures in the Building Sector in Germany: towards a Net Zero Building Development. Energy Efficiency Technologies Conference, 27.08.2021.
- [13] G. Grün: Entwicklung einer Modulfassade und Erprobung als funktionaler Mockup, Meet (y)our Experts: Modulares Bauen, 21.10.2021.

- [14] W. Schlüter: Möglichkeiten der Abwärmeverstromung im Aluminium-Schmelzbetrieb. Sitzung des Fachausschusses Leichtmetall-, Sand- und Kokillenguss des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie, Badeckenstedt, 2020.
- [15] W. Schlüter: Abwärmeverstromung im Aluminium-Schmelzbetrieb. Plenarsitzung des Fachausschusses Druckguss des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie, Nürnberg, 2020.
- [16] J. Dettelbacher; W. Schlüter: Material- und Energieflusssimulation in Aluminium-Druckgussbetrieben. Posterpräsentation Matlab Expo. MathWorks. München, 2019.
- [17] J. Dettelbacher: Energieeffizienz durch Simulation. Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energie Campus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [18] F. Mielke; C. Mack: Transparente Produktion durch Online-Visualisierung des Gussbetriebes. Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energie Campus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [19] W. Schlüter: Digitalisierung als Schlüsseltechnologie für den Gussbetrieb der Zukunft. FAPS IPC Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energie Campus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [20] W. Schlüter (2019): Abwärmeverstromung in der Aluminium-Gussindustrie. Plenarsitzung des Fachausschusses Druckguss des BDG. 19. Druckgusstag. Schorndorf, 2019.
- [21] Schlüter, Wolfgang (2018): Neue Ideen zur Abwärmenutzung in NE-Druckgussbetrieben. Fachausschusssitzung Druckguss. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (bdguss). Erl, Österreich, 18.10.2018.
- [22] Schlüter, Wolfgang (2018): Automatisierungstechnische Anforderungen bei der Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen in der NE-Schmelz- und Druckgussindustrie. (Vortrag). 3. Symposium Gießerei 4.0 in der Praxis. VDG Akademie. Düsseldorf, 21.09.2018.
- [23] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): Hybride Materialfluss- und Energiesimulation eines Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetriebs. (Vortrag). MATLAB Expo 2018. München, 26.06.2018.
- [24] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): E|Melt: Entwicklung eines Demonstrators zum Aufzeigen der Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im NE-Schmelz und Druckgussbetrieb. (Vortrag). Internationaler Deutscher Druckgusstag 2018. Nürnberg, 15.01.2018.
- [25] W. Schlüter. Mehr Energieeffizienz im Schmelzbetrieb: Ergebnisse aus Simulationsstudien. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (BDG) Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss 2017.
- [26] W. Schlüter. Die Virtuelle Leitwarte: Demonstration eines Prozessmanagementsystems für den NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (BDG) Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss 2017.
- [27] W. Schlüter: Prozessoptimierung in der energieintensiven Industrie durch Online-Datenerfassung und –verarbeitung (Industrie 4.0). Innovationsforum Mittelstand. Nachhaltige Energiesysteme - sicher, dezentral, vernetzt. Abschlusskonferenz 2017.
- [28] Allar, C. und Krcmar, W.: Einfluss des Interfaces zwischen polymeren Nanofasern und Silica-Aerogelen auf werkstofftechnische Eigenschaften, Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 20. Dezember 2017.
- [29] Krcmar, W.: „Modellprojekt Herzo Base – Energiespeicherhäuser“, Vortrag anlässlich der Jahreskonferenz des Energie Campus Nürnberg 2017, 13.12.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [30] Schmidt, S. und Krcmar, W.: Die Wirkungsweise amorpher Kieselsäure in hochwärmedämmendem Putz- und Dünnbettmörtel“, Vortrag anlässlich der EnCN Jahreskonferenz 2017, 13.12.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [31] Krcmar, W.: „Vorstellung laufender und Vorschläge für künftige F & E-Projekte“, Vortrag im Themenfeld „Gebäudeeffizienz und effiziente Produktionsprozesse“, anlässlich des BayWISS Workshops „Energie“, 30.11.2017/01.12.2017, Fraunhofer-Forschungscampus Waischenfeld.
- [32] Raab, B. und Krcmar, W.: Durchführung 2-tägige Fachexkursion mit Studierenden des Masterschwerpunkts „Silikat- und Grobkeramik“ zur Firma Feldhaus Klinker, Bad Laer, 28./29.11.2017.
- [33] Krcmar, W., Hesse, N. und Hildebrand, J.: Energieeffiziente Baustoffe für Neubau und Sanierung; Vortrag und Präsentationsstand anlässlich des „Akademischen Mauerwerkstag 2017“ des Ziegelzentrum Süd e.V., Technische Hochschule Nürnberg/Fakultät Architektur, 17.11.2017.

- [34] Krcmar, W.: Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen, Poster-Präsentation anlässlich der Verleihung des „European Energy Award“ in Gold an die Stadt Herzogenaurach, bayerische energie agenturen, 06.11.2017, München.
- [35] Krcmar, W.: Durchführung „Zieglerseminar“, Innovationszirkel der Ceramix AG Nürnberg, 27.09.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [36] Wedel, N., Allar, C., Krcmar, W. et al.: Aerogel-Faser-Verbundwerkstoffe, Vortrag anlässlich der Arbeitsgruppensitzung Forschungsprojekt „NanoFIM“ (FKZ 03SF0543B), 25.09.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [37] Betzold, C. und Krcmar, W.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; Vortrag und Präsentationsstand anlässlich der Auftaktveranstaltung zur Klimaschutzwoche Herzogenaurach, 16.09.2017, Herzogenaurach.
- [38] Krcmar, W.: Präsentationsstand „Smart City Energy Jam“, Stadt Nürnberg, 17./18.07.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [39] Krcmar, W.: „Recyclat-Ziegel“, Vortrag anlässlich der Arbeitsgruppenbesprechung Forschungsprojekt „TOGRA“ (FKZ NW-1303-0007), Porotonwerk Schlagmann, 30.06.2017, Zeilarn.
- [40] Krcmar, W.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“, Vortrag anlässlich der 11. Konferenz Solarökologische Bausanierung, Solarzentrum Mecklenburg-Vorpommern, Wietow, 27./28.04.2017.
- [41] Krcmar, W.: „Building Materials Against Outside Heat“; Präsentation at the Symposium „Recent Advances in Renewable Energy Technologies“; Texas A&M University at Doha; 03.04.2017, Qatar.
- [42] Krcmar, W.: Durchführung „Zieglerseminar“, Innovationszirkel der Ceramix AG Nürnberg, 29.03.2017, Energie Campus Nürnberg.
- [43] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: NanoFIM – Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude, Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg, März 2017, EnCN.
- [44] Schmidt, S., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Improvement of insulation using modified mortar bed technique“; Poster anlässlich der Tagung „From the mine to the Product“, 13./15.03.2017, Martin Luther Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie.
- [45] Dentel, A. und Krcmar, W.: Teilnahme am Kongress „EnergieEffizienzBauen“ mit Poster-Präsentation „Herzo Base Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“, 30./31.01.2017, Berlin.
- [46] Allar, C., Wedel, N. und Krcmar, W.: Vortrag „Applikationsmöglichkeiten polymerer Nanofasern im Bau- und Dämmstoffbereich; Jahreskonferenz des EnCN 2018, 13.12.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [47] Krcmar, W. und Raab, B.: „Ziegelexkursion 2018 mit Fachtagung“ für Studierende des Master-Studiengang Werkstofftechnik, Jacobi Tonwerke GmbH, Bilshausen, 20./21.11.2018.
- [48] Krcmar, W.: Workshop „Kreislauf-Wirtschaft in der Bauindustrie“; Cross-Cluster „Energietechnik/Neue Werkstoffe“, 08.11.2018, Bayern Innovativ, Nürnberg.
- [49] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Vortrag „Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktdampferzeuger“; Jahrestreffen 2018 d. Arbeitsgruppe „Speicher A“, Prof. Dr. Karl (FAU), 30.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [50] Kießling, G. und Krcmar, W.: „Herzo Base – Energiespeicherhäuser: Ein Praxisbericht über hochwärmedämmende Wandbaustoffe in Verbindung mit aktuellen Speichertechnologien“; Vortrag anlässlich der Veranstaltung der ENERGIEregion Nürnberg e.V. „Die EnEV 2014/2016 in Theorie und Praxis“, 16.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [51] Krcmar, W.: Vortrag „Wandbaustoffe – Entwicklung höchstwärmedämmender Bau- und Dämmstoffe mit verminderter Wärmeleitfähigkeit“; Vortrag anlässlich Veranstaltung von Bayern Innovativ „Gebäude – Energieeffizienz“, 11.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [52] Krcmar, W.: „Effiziente Energienutzung“; Vortrag anlässlich Besuch MdB Katja Hessel im EnCN, 02.10.2018.
- [53] Karsdorf, R., Sappa, D., Kugler, F. und Krcmar, W.: Vortrag „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping; Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus.

- [54] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Vortrag „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste“; Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [55] Allar, C., Wedel, N. und Krcmar, W.: Forschungsprojekt Nano-FIM: „Zwischenbericht zu erfolgten Arbeiten und bisherige Ergebnisse“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [56] Sappa, D. und Krcmar, W.: „Herstellung und Charakterisierung aerogelmodifizierter Zusatzstoffe und deren Einfluß auf die werkstofftechnischen Eigenschaften portlandzementhaltiger Bindebaustoffe“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 19.09.2018.
- [57] Karsdorf, R. und Krcmar, W.: Vortrag „Einfluss von Gefügeorientierung, Zusatzstoffen, Sinterzeit und -temperatur auf die spezifische Wärmekapazität und Schallausbreitung in Ziegelkeramik“; Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 05.09.2018.
- [58] Gehrman, R. und Krcmar, W.: Vortrag „Häuser drucken“, quick-mix, 14.08.2018, Osnabrück.
- [59] Krcmar, W.: Professorentagung/Exkursion; Weil am Rhein (Vitra Campus), Zürich, Colmar, Basel, Veranstaltung des Ziegelzentrum Süd, 12./15.07.2018.
- [60] Krcmar, W.: Vortrag “Highly insulating building materials”; Visit of Walloon Delegation at EnCN, 26.06.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [61] Krcmar, W.: Vortrag “Hochwärmedämmende Baustoffe”; Informationsveranstaltung des EnCN für Delegation Hochschule Bochum, 29.05.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [62] Krcmar, W. und Allar, C.: “Pilot line for the production of extruded laboratory bricks and extruded geopolymer-foam”; “LightCoce”-Meeting (HORIZON 2020), 24.05.2018, National Technical University of Athens.
- [63] Reich, S., Trotsenko, S., Datsyuk, V., Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: Meilensteinsitzung Forschungsprojekt „NanoFIM“, 08.05.2018, Fakultät Physik, Freie Universität Berlin.
- [64] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel und Putzmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 25.04.2018, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [65] Krcmar, W.; Ullermann, K. und Strohmenger, P.: Präsentationsstand „Energieeffiziente Bau- und Dämmstoffe sowie Brenner- und Ofentechnik“; Messe CERAMITEC 2018, 10.-13.04.2018, München.
- [66] Karsdorf, R. und Krcmar, W.: „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 21.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [67] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 21.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [68] Krcmar, W.: Vortrag „Energieeffiziente Baustoffe für Neubau und Sanierung“; Mitgliederversammlung Güteschutz-Ziegel, e.V., 20.03.2018, Würzburg.
- [69] Krcmar, W.: Vortrag “EFFIZIENZ”; 8. Sitzung des EnCN-Fachbeirats, 16.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [70] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Künstliche und natürliche Werkstoffe als Speichermedium für spitzenlastfähige Hochtemperatur-Wärmespeicher“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 20.12.2017, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [71] Gerstner, M., Allar, C. und Krcmar, W.: Internationales Seminar „Kubanische Energiewende: Sancti Spiritus als künftige Modellregion für erneuerbare Energien“, Vorträge „1. Ausbau der Kreislaufwirtschaft in Kuba“, 2. „Neue hochwärmedämmende Baustoffe für die Gebäudehülle“, 3. „Konzeptvorschlag für den Bau eines Niedrig-Energie-Hauses in Sancti Spiritus aus Wärmedämm-Ziegeln und mit dezentraler Energieversorgung“; 4. „Silica-Aerogele und Geopolymere“, Universität Sancti Spiritus, Kuba (24.-28.09.2019).

- [72] Sappa, D., Karsdorf, R. und Krcmar, W.: „Ziegel 2020 – Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“, Vortrag im Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der CERAMIX AG Nürnberg, Energie Campus Nürnberg (23.10.2019).
- [73] Krcmar, W.: „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste – neue Beschichtungsergebnisse“, Vortrag anlässlich der 16. Arbeitssitzung des Innovationsring Hintermauerziegelindustrie der CERAMIX AG, Energie Campus Nürnberg (03.04.2019).
- [74] Krcmar, W. and Allar, C.: „Pilot line for the production of extruded laboratory bricks“, Presentation at the EU-project „LightCocce“-Update Meeting, Brussels (07.03.2019).
- [75] Krcmar, W. and Allar, C.: „Pilot line for the production of extruded laboratory bricks“, Kick-off Meeting EU-project „LightCocce; University of athens, Greece (23./24.01.2019).
- [76] Sappa, D., Karsdorf, R. und Krcmar, W.: 2 Vorträge und 2 Poster „Ziegel 2020 – Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“, Arbeitssitzung Projektträger Jülich, Energie Campus Nürnberg (13.02.2019).
- [77] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste; Teil IV (03.04.19) und Teil V (23.10.19), Vorträge im Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der CERAMIX AG Nürnberg, Energie Campus Nürnberg.
- [78] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Künstliche und natürliche Werkstoffe als Speichermedien für spitzenlastfähige Hochtemperatur-Wärmespeicher“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle / Saale (20.12.2017).
- [79] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktdampferzeuger“; Vortrag EnCN-Jahreskonferenz 2019, Energie Campus Nürnberg (05.12.2019).
- [80] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Applikation von Beschichtungen zur Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Absenkung des Emissionskoeffizienten und Scale-up in den Technikumsmaßstab“; Poster für Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (31.10.2017).
- [81] Zeyer, K., Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Optimization of the structure of ceramic heat storage materials for electrically heated and dynamically stored direct steam generators“; Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (22.01.2020).
- [82] Sappa, D., Karsdorf, R. und Oeder, K.: „Ziegel 2020 – Ziegelentwicklung mittels Rapid Prototyping“; Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (Dezember 2019).
- [83] Karsdorf, R., Kugler, F., Oeder, K., Sappa, D., Roth, O., Karrer, J. und Krcmar, W.: „Simulation, Optimierung und Herstellung von Ziegelprototypen auf PLA-Basis“; Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (Januar 2019).
- [84] Karsdorf, R., Kugler, F., Oeder, K., Sappa, D., Roth, O., Karrer, J. und Krcmar, W.: „Modellierung eines Mauerziegels mit optimierten Schalldämm-Eigenschaften“; Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (Januar 2019).
- [85] Heckel, C., Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Untersuchung des Brandverhaltens beschichteter Mauerziegel“; Poster-Ausstellung Hochschule Magdeburg und Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (01.12.2019).
- [86] Krcmar, W.: „Highly heat insulating building materials“; Vortrag anlässlich Workshop „Wallonia meets Energy Campus Nuremberg, Ottignies-Louvain-la-Neuve, Belgien, 08.-10.12.2019.
- [87] 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.
- [88] 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.

- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: Vortrag „Auswirkung der Porenform auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Ziegelkeramik“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [93] 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, Pfürring.
- [94] 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.
- [95] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Vortrag „Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktverdampferzeuger“; anlässlich Jahrestreffen 2020 der Arbeitsgruppe „Speicher A“, Prof. Dr. Karl (FAU), 26.05.2020, Energie Campus Nürnberg.
- [96] 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.
- [97] 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, 2 nd Plenary Meeting, 14./15.01.2020, THN/EnCN, Nuremberg.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] Oeder, K. und Krcmar, W.: Vortrag „Vorstellung der Ziele im EU-Projekt „LightCoce“ “; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [103] Allar, C. und Krcmar, W.: Vortrag „Synthese von faserverstärkten Silica-Aerogel-Monolithen“; EnCN-Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [104] 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.

- [105] 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.
- [106] Kugler, F. und Krcmar, W.: Vortrag: „Entwicklung geopolymerbasierter klimafreundlicher Baustoffe“; EnCN - Jahreskonferenz 2020, 10.12.2020, THN/EnCN.
- [107] F. Kugler, R. Karsdorf, T. Fehn, U. Teipel, W. Krcmar: „Suitability of construction and demolition residuals for the production of novel geopolymer building materials“, Poster, 3rd European Mineralogical Conference 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [108] F. Kugler, W. Krcmar: „Construction and demolition residuals as raw materials for the production of geopolymer building materials“, Vortrag, Jahreskonferenz EnCN, 02.12.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [109] F. Kugler, W. Krcmar: „Geopolymere ein neuartiger Baustoff aus Reststoffen der Bau- und Abbruchindustrie“, Vortrag, Veranstaltung „G’scheit schlau! Das lange Wochenende der Wissenschaften“, 22.10.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [110] J.-S. Hildebrand, W. Krcmar: „Influence of pore geometry on the thermal insulation properties of porous brick ceramics“; Poster, 3rd European Mineralogical Conference, 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [111] J.-S. Hildebrand, W. Krcmar: „Influence of pore geometry on the thermal shock resistance of porous cordierite heat storage material investigated by numerical simulation“; Poster, 3rd European Mineralogical Conference, 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [112] J. Seibold, J.-S. Hildebrand, W. Krcmar: „Influence of pore geometries on the thermal shock resistance in ceramics investigated by numerical simulation“; Vortrag, Applied Research Conference, 23.07.2021, OTH Amberg-Weiden.
- [113] J.-S. Hildebrand, W. Krcmar: „Simulation von entstehenden Thermospannungen durch schlagartige Temperaturwechsel bei porösen Keramiken“; Vortrag, Jahreskonferenz EnCN, 02.12.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [114] D. Sappa, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Herstellung und Charakterisierung aerogelmodifizierter Zusatzstoffe und deren Einfluss auf die werkstofftechnischen Eigenschaften portlandzementhaltiger Bindebaustoffe“, Vortrag, Institut für Geowissenschaften Mineralogie/Geochemie, Arbeitsgruppe Prof. Dr. Dr. Pöllmann, 10.03.2021, Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg.
- [115] D. Sappa, M. Glenk, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Improvement of the thermal insulation properties of thin-bed mortar by using of diatomaceous earth as an additive“, Poster, 3<sup>rd</sup> European Mineralogical Conference, 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [116] D. Sappa, W. Krcmar: „Einfluss von Kieselgur auf die werkstofftechnischen Eigenschaften von Dünnbettmörtel“, Online-Vortrag, Veranstaltung „G’scheit schlau! Das lange Wochenende der Wissenschaften“, 22.10.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [117] D. Sappa, W. Krcmar: „Einfluss von Kieselgur auf die werkstofftechnischen Eigenschaften von Dünnbettmörtel“, Online-Vortrag, Jahreskonferenz EnCN, 02.12.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [118] C. Allar, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Einfluss des Interfaces zwischen polymeren Nanofasern und Silica-Aerogelen auf werkstofftechnische und chemische Eigenschaften“, Vortrag, Institut für Geowissenschaften Mineralogie/Geochemie, Arbeitsgruppe Prof. Dr. Dr. Pöllmann, 03.03.2021, Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, 03.03.2021.
- [119] C. Allar, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Development of a novel hydrophobization method for silica aerogels reinforces with nano-scale polystyrene fibers“, Vortrag, 3rd European Mineralogical Conference, 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [120] C. Allar, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Entwicklung einer alternativen Rezeptur zur Synthese faserverstärkter Silica-Aerogele mit hydrophoben Eigenschaften“, Online-Vortrag, Jahreskonferenz EnCN, 02.12.2021, THN/Energie Campus Nürnberg.
- [121] K. Oeder, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Einfluss der In-situ-Wasserstoff-Porosierung portlandzementhaltiger Baustoffe auf Wärmeleitfähigkeit und ausgewählte mechanische Werkstoffeigenschaften“, Vortrag, Institut für Geowissenschaften Mineralogie/Geochemie, Arbeitsgruppe Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 17.02.2021.

- [122] C. Betzold, C. Köpke und W. Krcmar: Vortrag "Herzo Base – Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäudekonzept von morgen - mit hochwärmedämmenden Ziegeln"; Web-Seminar „solid UNIT“ "Energieeffizienz mit mineralischen Baustoffen", 06.10.2021.
- [123] K. Oeder, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Influence of in situ hydrogen porosification of portland cement products with aluminium and zinc powder on thermal conductivity and mechanical parameters"; Online-Vortrag, 3rd European Mineralogical Conference, 29.08.2021-02.09.2021, Krakau/Polen.
- [124] K. Oeder, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Einfluss der Wasserstoff-Porosierung portlandzementhaltiger Baustoffe auf Wärmeleitfähigkeit und mechanische Eigenschaften“, Vortrag, Jahreskonferenz EnCN, 02.12.2021, Energie Campus Nürnberg.

## 7 Veröffentlichungen

- [1] Dentel, A., Betzold, C. (2021). Activation of the building thermal mass to store PV surplus energy. The 17th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2021, Bruges, Belgium.
- [2] Betzold, C., Dentel, A. (2021). Evaluation and test operation of different model predictive control approaches for an energy system. The 17th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2021, Bruges, Belgium.
- [3] Betzold, C., Bordin, S., Dentel, A. and Harhausen G., 2021. Control strategies for modulating heat pumps in a plus energy building. Proceedings of 13th International Heat Pump Conference 2020, April 27th – 29th, 2021, Jeju, Korea.
- [4] S. Feroze, A. Distler, M. Wagner, S. Bordin, M. Braun, G. Kießling, F. Hoga, K. Senguttuvan, M. Neberich, A. Dentel, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, Multifunktionale modulare Fassadenelemente mit integrierter organischer Photovoltaik, *BWK Energie*. 2021, 73(7-8), 16–21
- [5] M. Eberl, H. Sinnesbichler, G. Grün. Technische Mock-Ups zur Absicherung integraler Fassaden-Konzepte. *FASSADE - Technik und Architektur*, 26 (2), S. 18-21, 2017
- [6] M. Eberl, H. Sinnesbichler, G. Grün. Technisch-funktionale Modelltests zur Absicherung integraler Fassadenkonzepte. *nachhaltige technologien 2/2017*, S. 17-19.
- [7] G. D. Kontes, G. I. Giannakis, V. Sánchez, P. de Agustin-Camacho, A. Romero-Amorrortu, N. Panagiotidou, D. V. Rovas, S. Steiger, C. Mutschler, G. Grün: Simulation-based Evaluation and Optimization of Control Strategies in Buildings. In: *Energies* 11 (2018), Nr. 12, S. 3376.
- [8] G. Grün: Integrierte Systeme Planen. In: *Deutsche Bauzeitschrift DBZ*, 01/2019
- [9] G. F. Schneider, G. D. Kontes, Haonan Qiu, F. J. Silva, M. Bucur, J. Malanik, Z. Schindler, P. Andriopolous, P. de Agustin-Camacho, A. Romero-Amorrortu, G. Grün: Design of knowledge-based systems for automated deployment of building management services, *Automation in Construction*, Volume 119, 2020, 103402, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103402>.
- [10] M. Eberl, H. Sinnesbichler, G. Grün: Technischer Mockup-Test für innovative Fassadenkonzepte. In: *GFF magazin* 5-6/2020, S. 112-113.
- [11] Dettelbacher, J.; Schlüter, W. (2021): Material- und Energieflusssimulation zur prädiktiven Bestimmung von Ofenreinigungsintervallen. In: Jörg Franke und Peter Schuderer (Hg.): *Simulation in Produktion und Logistik*. 19. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Erlangen, 15.-17.09.2021. ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation. Cuvillier-Verlag Göttingen, S. 85–92. (A)
- [12] Schlüter, W.; Adamchuk, N. (2021): Schnittstellenimplementierung zum Aufbau einer numerischen Prozesskette in der Eisengussindustrie. *Virtueller ASIM Workshop 2021 Simulation Technischer Systeme / Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation & Edukation und Simulation*; ARGESIM Report 45, Proceedings ASIM STS/GMMS & EDU 2021.(B)
- [13] Krcmar, W.: „Wirbelschichtreaktor – Entwicklung einer Pilotanlage zur thermischen Behandlung organischer, metallischer und keramischer Mikrobauerteile in der Wirbelschicht“, *Berichte zur Vorlaufforschung, Schriftenreihe der TH Nürnberg*, Heft 23 (2017).

- [14] Geber, A., Döbbelin, M. und Krcmar, W.: „Entwicklung eines gasbefeuerten Wirbelschicht-Sinterofens für keramische Elektronikbauteile kleinster Abmessungen“; Abschlussbericht STAEDTLER-Stiftung, 20.04.2017, Nürnberg.
- [15] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: Zwischenbericht Forschungsprojekt „NanoFIM“, Projektträger Jülich, FKZ 03SF0543B), 24. 04.2017.
- [16] Wedel, N. und Krcmar, W.: „Neuartige Trocknungsverfahren von keramischen Formlingen: Entwicklung eines neuen energieeffizienten Verfahrens zur Feuchteableitung pressfeuchter Ziegelrohlinge“, ZIM-Kooperationsprojekt (BMW), FKZ: KF 2151802SU4, Abschlussbericht, 11.04.2017.
- [17] Schmidt, S., Grotz, T., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Effects of fumed silica on material engineering parameters of external rendering, with special emphasis on thermal conductivity and compressive strength“; ZKG International 10/2018, pp. 42-51.
- [18] Schmidt, S., Sappa, D., Pöllmann, H. and Krcmar, W.: „Improving the thermal insulation properties of thin-bed mortar – Part II: Effects of selected admixtures and combinations thereof on material properties, in particular pore-size distribution, thermal conductivity and compressive strength“, ZKG International 9/2018, pp. 52-67.
- [19] Schmidt, S., Pöllmann, H. and Krcmar, W.: „Improving the thermal insulation properties of thin-bed mortar – Part I: Impact evaluations of various admixtures on material engineering parameters“, ZKG International 6/2018, pp. 42-54.
- [20] Schmidt, S.: „Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit“; Dissertationsschrift 5/2018, Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg/Prof. Dr. Krcmar, TH Nürnberg/EnCN.
- [21] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung einer Bindebaustoffmischung“; Anmeldung: 28.11.2017. DE, Patentschrift DE 10 2017 128 150.9.
- [22] Kränzlein, E., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Metal powders as foaming agents in fly ash based geopolymer synthesis and their impact on the structure depending on the Na/Al ratio“; Cement and Concrete Composites, Vol. 90, July 2018, pp. 161-168, Elsevier.
- [23] Krcmar, W., Kießling, G., Dentel, A., Betzold, C., Koutrouveli, K., Hesse, N., Raab, G. und Schoepe, W.: „HerzoBase-Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; In: Bautenschutz - Nachweismethoden und Anwendungen, Herausgeber Helmuth Venzmer; ISBN 978-3-00-060009-8, Edition Bautenschutz Insel Poel, 2018.
- [24] E. Kränzlein, E.; Harmel, J., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: Influence of the Si/Al ratio in geopolymers on the stability against acidic attack and the immobilization of Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>; J. Construction and Building Materials, 227/10.12.2019, ELSEVIER.
- [25] Zeyer, K., Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Werkbericht „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste“; Verleihung des „Franken-Schotter-Preis 2019“ für den Werkbericht, Akademische Jahrfeier, Technische Hochschule Nürnberg (11.11.2019).
- [26] 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 (30.04.2019).
- [27] Sappa, D., Karsdorf, R. und Krcmar, W.: „Ziegel 2020: Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“; PTJ-FKZ: 03ET1526A, 1. Zwischenbericht (30.04.2019).
- [28] 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.
- [29] Sappa, D., Karsdorf, R., Oeder, K., Kugler, F. und Krcmar, W.: „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“ , PTJ-FKZ: 03ET1526A, 2. Zwischenbericht, 30.04.2020.
- [30] 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.

- [31] 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.
- [32] F. Kugler, J. Aumüller, T. Fehn, U. Teipel, W. Krcmar: „Construction and demolition residuals as raw materials for the production of novel geopolymer building materials“, Special Publications of the Geological Society London, eingereichte Publikation, 2021/2022.
- [33] F. Kugler, T. Fehn, M. Harder, U. Teipel, W. Krcmar: „Recycling von Sekundärrohstoffen – Wie gut eignen sich Sekundärrohstoffe der Abbruch- und Bauindustrie zur Herstellung neuartiger Geopolymer-Baustoffe ?“, ReSource, eingereichte Publikation, 2021/2022.
- [34] J.-S. Hildebrand, J. Seibold, K. Hertlein, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Einfluss der Porengeometrie auf die Wärmedämmeigenschaften porosierter Ziegelkeramik“; Ziegelindustrie International (ZI), 04/2021, Bauverlag Gütersloh.
- [35] J. Seibold, J.-S. Hildebrand, W. Krcmar: „Influence of pore geometries on the thermal shock resistance in ceramics investigated by numerical simulation“, Konferenzband „Applied Research Conference“, 23.07.2021, OTH Amberg-Weiden.
- [36] D. Sappa, F. Kugler, W. Krcmar: „Herzo Opt-Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“, Zwischenbericht, PTJ-FKZ 03ET1641A, 30.06.2021.
- [37] C. Allar, T. Roth, L. Samorey, S. Trotsenko, S. Reich, H. Pöllmann, W. Krcmar: „Development of a novel two-step surface modification for hydrophobization of silica aerogels reinforced with polystyrene nanofibers“, Journal of Microporous Solids (eingereichte Publikation 2021/2022).
- [38] Adamchuk, N.; Schlüter, W. (2021): Completing the numerical process chain in the foundry industry by software interfaces. Analyzing the numerical process chain and determining the missing software interfaces. In Ceight Casting. Fraunhofer LBF, Darmstadt, Februar 2021. Fraunhofer IRB-Verlag (Verlag). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter <http://dnb.info/1228166048>. (A)
- [39] Dettelbacher, J.; Schlüter, W. (2020): Simulationsgestützte Optimierung des Materialflusses in einem Aluminium-Gussbetrieb. In: ARGESIM Report 59, Proceedings ASIM SST 2020, S. 343–348. (B)
- [40] Dettelbacher, J.; Schlüter, W. (2020): Simulative Study of Aluminium Die Casting Operations Using Models with Varying Degrees of Detail. In: SNE - Simulation Notes Europe (Vol.30 No.4), S. 183–188. Online verfügbar unter 2306-0271. (A)
- [41] Schlüter, W.; Hanna, J.; Zacharias, K. (2020): Simulationsbasierte Dimensionierung von Regeneratoren für eine volatile Hochtemperatur-Abwärmeverstromung. In: ARGESIM Report 59, Proceedings ASIM SST 2020, S.281–288. (B)
- [42] Dettelbacher, J.; Schlüter, W. (2019): Simulative Untersuchung von Aluminium-Druckgussbetrieben anhand von Modellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. In: Matthias Putz und Andreas Schlegel (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik. 18. ASIM Fachtagung. S. 509–517. (A)
- [43] Dettelbacher, J.; Schlüter, W. (2019): Simulative Untersuchung von Betriebserweiterungen in einem Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetrieb. In: Umut Durak, Christina Deatcu und Jan Hettwer (Hg.): Tagungsband ASIM Workshop STS/GMMS 2019. Simulation Technischer Systeme. Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation. ARGESIM Report, S. 53–58. (B)
- [44] Zacharias, K.; Schlüter, W. (2019): Charakterisierung von gestörten Geschwindigkeitsprofilen in runden, rechteckigen und quadratischen Strömungsgeometrien. In: Umut Durak, Christina Deatcu und Jan Hettwer (Hg.): Tagungsband ASIM Workshop STS/GMMS 2019. Simulation Technischer Systeme. Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation. ARGESIM Report, S. 35–40. (B)
- [45] Buswell, A.; Henninger, M.; Müller, S.; Schlüter, W. (2018): Simulation for Energy Efficiency of Non-Ferrous Melting and Die Casting Plants. In: Casting Plant and Technology International 01/2018, S. 42–47. Online verfügbar unter <https://www.yumpu.com/en/document/view/59909656/cptinternational-01-2018>.(A)
- [46] Buswell, A.; Schlüter, W.(2018): A flexible material flow and energy simulation in the context of Industry 4.0. In: Christina Deatcu, Thomas Schramm und kay Zobel (Hg.): Tagungsband ASIM SST 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik (AM168). ASIM 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg, 04-05.10.2018. HafenCity Universität Hamburg. Wien: ARGESIM Verlag (ASIM Mitteilung AM, 168), S. 89–95.(A)

- [47] Buswell, A.; Schlüter, W. (2018): E|Melt: Simulation-driven examination of energy efficiency measures inside non-ferrous melting and die-casting plants. In: Jörg Franke, Michael Scholz und Annika Höft (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production IV. Applied Mechanics and Materials Volume 882. Zürich: Trans Tech Publications, S. 182–189.(A)
- [48] Müller, S.; Schlüter, W. (2018): Smart Melting: Increasing efficiency in non-ferrous melting and diecasting plants through incident management. In: Jörg Franke, Michael Scholz und Annika Höft (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production IV. Applied Mechanics and Materials Volume 882. Zürich: Trans Tech Publications, S. 174–181.(A)
- [49] Henninger, M.; Schlüter, W. (2017): Entwicklung eines räumlich aufgelösten dynamischen Prozesssimulationsmodells eines Aluminiumschachtschmelzofens. In: Walter Commerell und Thorsten Pawletta (Hg.): ASIM-Treffen STS/GMMS 2017: Workshop der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMMS: 9./10. März 2017 in Ulm : Tagungsband, Bd. 1. ASIM-Treffen STS/GMMS 2017. Ulm, 9. und 10. März. Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM. 1 Band. Wien: AGRESIM, S. 12–17.(B)
- [50] Henninger, M.; Schlüter, W.; Jeckle, D.; Schmidt, J. (2017): Simulation Based Studies of Energy Saving Measures in the Aluminum Tool and Die Casting Industry. In: Jörg Franke und Sven Kreitlein (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production Vol. II: Trans Tech Publications (Applied Mechanics and Materials, 856), S. 131–143.(A)
- [51] Krieg, J.; Schlüter, W. (2017): Softwarebasierte Analyse von Simulationsdaten durch automatisierte Berechnung von Kennzahlen. In: Walter Commerell und Thorsten Pawletta (Hg.): ASIM-Treffen STS/GMMS 2017: Workshop der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMMS : 9./10. März 2017 in Ulm : Tagungsband, Bd. 1. ASIM-Treffen STS/GMMS 2017. Ulm, 9. und 10. März. Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM. 1 Band. Wien: AGRESIM, S. 144–149.(B)
- [52] Schlüter, W.; Henninger, M.; Buswell, A. (2017): Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: Sigrid Wenzel und Tim Peter (Hg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017. 17. ASIM Fachtagung "Simulation und Logistik". Kassel, 20-22.09.2017. Kassel: Kassel University Press, S. 19–28.(A)
- [53] S. Deitsch, C. Buerhop-Lutz, E. Sovetkin, A. Steland, A. Maier, F. Gallwitz, C. Riess: Segmentation of Photovoltaic Module Cells in Electroluminescence Images, *Journal of Machine Vision and Applications*, 32, 84 (2021).
- [54] S. Deitsch, V. Christlein, S. Berger, C. Buerhop-Lutz, A. Maier, F. Gallwitz, C. Riess: Automatic Classification of Defective Photovoltaic Module Cells in Electroluminescence Images, *Solar Energy*, Volume 185, June 2019, pp. 455-468.
- [55] C. Buerhop-Lutz, S. Deitsch, A. Maier, F. Gallwitz, and C. J. Brabec: A Benchmark for Visual Identification of Defective Solar Cells in Electroluminescence Imagery, 35th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, Belgium, September 2018.
- [56] Dalsass, M., S. Deitsch, D. Moerman, F. Gallwitz, and C. J. Brabec. Algorithmus zur IR-Panoramabilderstellung aus IR-Luftaufnahmen von PV-Freiflächenanlagen, In: 32. Symposium Photovoltaische Solarenergie. (Kloster Banz, Mar. 8–10, 2017). Bad Staffelstein, Germany, March 2017.
- [57] R. Steckel, C. Köbler, A. Kremser, and H.-G. Herzog, "Analysis of Harmonic Losses due to Inverter Supply in Dual Three-Phase Induction Machines," in 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC): IEEE, pp. 1–8, 2021.
- [58] J. Germishuizen, R. Steckel, and A. Kremser, "Algebraic synthesis and analysis of windings for AC machines," *Elektrotech. Inftech.*, vol. 138, pp. 78–84, 2021.
- [59] J. Germishuizen and A. Kremser, "Algebraic Design of Symmetrical Windings for AC Machines," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 57, no. 3, pp. 1928–1934, 2021.

---

## 8 Patente

---

- [1] P. Löhdefink; A. Dietz: „Antriebssystem zum elektromechanischen Antreiben eines mehrspurigen Fahrzeugs sowie entsprechendes mehrspuriges Fahrzeug“, Deutsche Patentanmeldung der Technischen Hochschule Nürnberg, DE4134240C2.
- [2] S. Wendel; B. Haucke-Korber; A. Dietz: „Cascaded continuous and finite model predictive control for mechatronic systems“, Europäische Patentanmeldung der Technischen Hochschule Nürnberg, EP18190294.
- [3] Schlüter, W.; Dentel, A.; Schmidt, J.; Vorrichtung und Verfahren zur Verteilung von Reinigungsintervallen bei Schmelzöfen in einem Schmelz- und Druckgussbetrieb, Deutsche Patentanmeldung DE10 2016 119702 A1, Anmelder: Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach und Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, angemeldet am 17.10.2016, veröffentlicht am 19.4.2018; Patentklasse B22D 17/30 und weitere.
- [4] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Offenlegungsschrift DE 10 2017 128 150 A1 (29.05.2019).
- [5] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, EU-Patentanmeldung, EP 18811202.3 (06.06.2019).
- [6] Q. V. Bui, D. Both, A. Dietz, M. Gerstner: „Stromversorgungseinheit und elektrische Maschine mit einer solchen Stromversorgungseinheit“, Anmeldung der Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Anmeldeaktenzeichen DE10 2020 101 991.2.
- [7] S. Wendel; B. Haucke-Korber; A. Dietz: „Cascaded continuous and finite model predictive control for mechatronic systems“, Anmeldung der Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Anmeldeaktenzeichen EP18190294.1

---

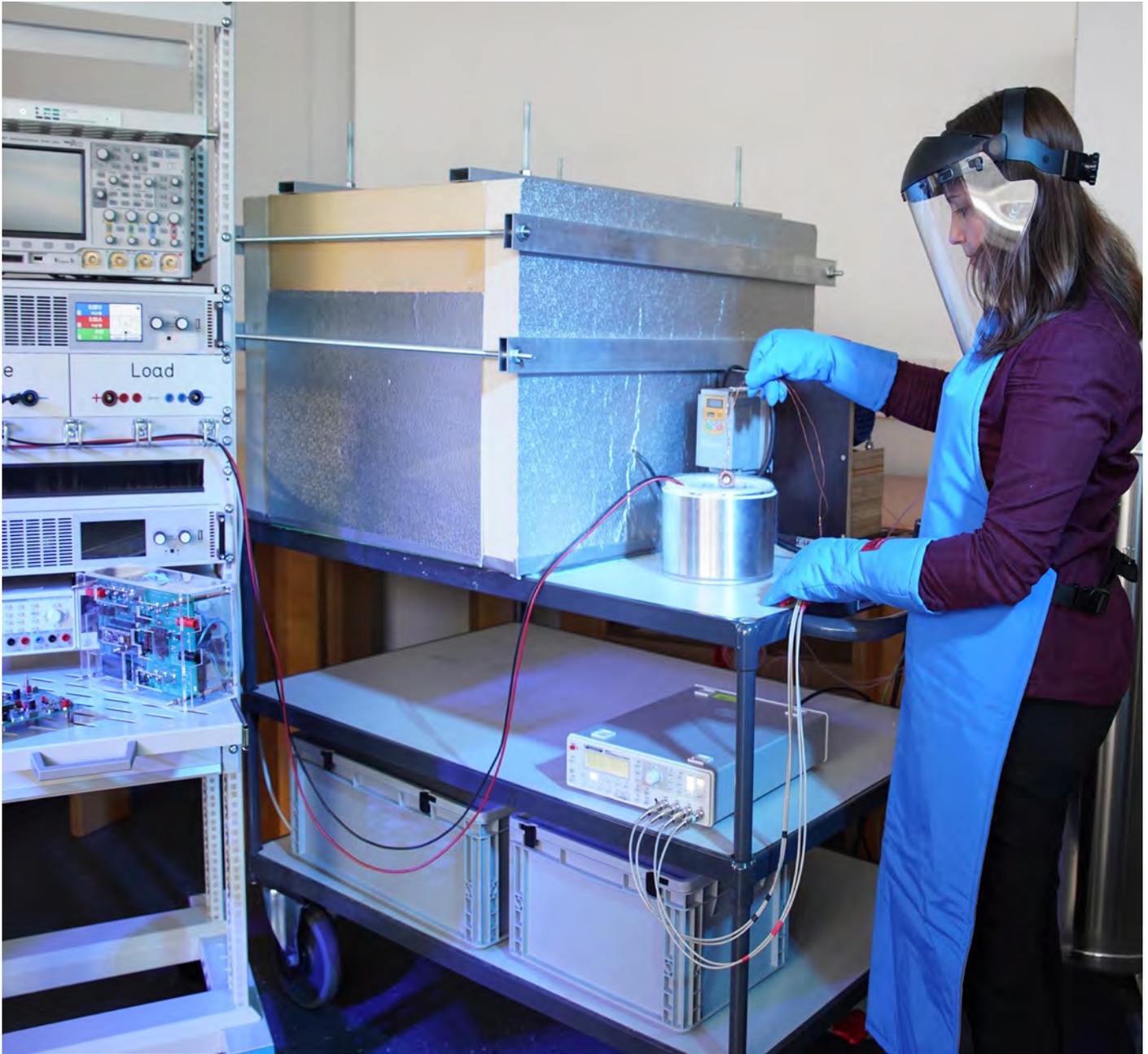
## 9 Literaturverzeichnis

---

- [1] Michael Stahr: „Sanierung von Fassaden, Putzen, Fugen“, Springer Vieweg, Leipzig, 2017, S. 278
- [2] <https://www.sanier.de/altbausanierung/baualterstufen/haeuser-70iger-jahre>, aufgerufen am 14.09.2020
- [3] Marco Ragonesi: „Bautechnik der Gebäudehülle“, Hochschulverlag ETH Zürich, 2018
- [4] [www.sanier.de/altbausanierung/baualterstufen/haeuser-80iger-jahre](http://www.sanier.de/altbausanierung/baualterstufen/haeuser-80iger-jahre), aufgerufen am 15.09.2020
- [5] Herzog Thomas- Fassaden Atlas, 2. Auflage, 2016, Kapitel B1 Naturstein
- [6] Kalksandstein – Planungshandbuch, Hannover, 2018
- [7] [www.bauen.de/dachsanierung](http://www.bauen.de/dachsanierung), aufgerufen am 15.09.2020

FORSCHUNGSBEREICH

# Energiemanagement-Technologien



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail  
[martin.maerz@fau.de](mailto:martin.maerz@fau.de)

Telefon  
+49 911 / 56854 99310

Web  
[www.encn.de/EMT](http://www.encn.de/EMT)

# Lehrstuhl für Leistungselektronik

## Projektbericht 2017 - 2021

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 damit die Grundvoraussetzung für jede Art der intelligenten und effizienten Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie.

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

Der Lehrstuhl LEE kooperiert eng mit dem Fraunhofer IISB, das bis 08/2021 ebenfalls mit einer Arbeitsgruppe am Energie Campus Nürnberg vertreten war. Gemeinsam bilden beide Einrichtungen den Kern des EnCN-Forschungsbereichs Energiemanagement-Technologien (EMT). 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 EnCN-Partnern ein Applikationslabor für innovative Energiemanagement-Technologien zur Verfügung. Darüber hinaus kooperiert der Forschungsbereich EMT des EnCN eng mit dem Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE), einer Initiative der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der beiden Fraunhofer Institute IIS und IISB, mit dem bayerischen Cluster Leistungselektronik und - auch im Rahmen kooperativer Promotionen – mit den Hochschulen Nürnberg, Coburg und Ostwestfalen-Lippe.

Bereits im Januar 2018 startete am Lehrstuhl LEE das Projekt NENUFAR (Next Generation of eNergy storagE solUtions For more electricAl aiRcrafts). NENUFAR ist Teil des Clean Sky Programms der EU, dem größten europäischen Forschungsprogramm zur Entwicklung innovativer Spitzentechnologien zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>- 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 für Leistungselektronik.

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.

### KONTAKT

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

Fraunhofer IISB



**E-Mail**  
martin.maerz@fau.de

**Telefon**  
+49 911 / 568554 – 99310

**Web**  
www.lee.tf.fau.de

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 neuartige leistungselektronische Wandler für das Energiemanagement an Bord zu entwickeln.

Im Jahr 2021 konnte mit GENESIS ein weiteres Clean Sky Projekt am Lehrstuhl gestartet werden. Neun Partner aus Industrie, Forschung und von Universitäten bilden ein multidisziplinär und fachlich komplementär aufgestelltes europäisches Konsortium mit dem Ziel, einen Technologie- und Nachhaltigkeitsfahrplan zu entwickeln, um die Ambitionen der europäischen Luftfahrtindustrie für den Übergang zu umweltverträglichen und wettbewerbsfähigen elektrischen und hybriden Flugzeugsystemen zu unterstützen. Dies erfolgt beispielhaft anhand von Konzeptdesigns für vollelektrische und hybride 50-PAX-Regionalflugzeuge. Es werden mehrere Alternativen zur Antriebsstrangtechnologie untersucht, darunter konventionelle Batterien, Brennstoffzellen und Hybridkombinationen davon, alle mit drei Zeitperspektiven über den Zeitraum 2020-2050. Diese Untersuchungen basieren auf technologischen Vorausschauanalysen zu Schlüsselementen des Flugzeugsystems mit einem Schwerpunkt auf der Antriebsstrangarchitektur und auf Energiespeicheralternativen. Dazu werden für jede Komponente und jeden relevanten Technologieprozess innerhalb des Flugzeuglebenszyklus - von der Ressourcengewinnung über die Herstellung und Nutzung bis zum Lebensende - Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen) erstellt und dazu verwendet, um prospektive Lebenszyklusbewertungen zukünftiger Flugzeugsystemkonfigurationen und -szenarien durchzuführen.

Gerade für Luftfahrtanwendungen stellt kryogener Wasserstoff eine hoch interessante Kraftstoffalternative dar. Auf dem Weg vom Tank zu einer Brennstoffzelle muss der Wasserstoff erwärmt werden und ist damit ideal als Kühlmedium für all die leistungselektronischen Wandler in einem Antriebsstrang geeignet. Speziell die Leistungshalbleiter arbeiten bei tiefen Temperaturen unterhalb von  $-150^{\circ}\text{C}$  um Faktoren effizienter, was deutlich erhöhte Wirkungsgrade und Leistungsdichten verspricht. Ein Forschungsschwerpunkt am LEE befasst sich daher mit der Charakterisierung und Modellierung leistungselektronischer Komponenten und Wandler bei sehr tiefen Temperaturen, um zum einen die Vorteile aber auch die Herausforderungen im Zusammenhang mit kryogen gekühlter Leistungselektronik besser zu verstehen. Aber nicht nur im Luftfahrtsektor verspricht kryogene Leistungselektronik erhebliche Effizienzvorteile, sondern auch bei stationären Anwendungen beispielsweise in der Energietechnik – insbesondere dann, wenn Kühlleistung quasi als Neben- oder Abfallprodukt einer konkreten Anwendung kostengünstig zur Verfügung steht.



Abbildung 1: Arbeiten mit kryogener Leistungselektronik

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 Partnern 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.

Basierend auf der langjährigen Erfahrung und den wissenschaftlichen Vorarbeiten am IISB und LEE im Bereich dezentraler Gleichspannungsnetze war der Lehrstuhl LEE gemeinsam mit dem auch „auf AEG“ ansässigen Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) im Rahmen der AiF-Ausschreibung für Leittechnologieprojekte mit

dem Verbundantrag DC|hyPASim erfolgreich. Das Projekt wird zum 1. März 2022 starten und umfasst die beiden Teilprojekte DC|hyPATwin (FAPS) und DC|hyPAMod (LEE). Ziel ist die digitale Abbildung, Simulation und Inbetriebnahme von hybriden AC/DC-gespeisten Produktionsanlagen kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU). Der Fokus des LEE liegt hierbei auf der elektrischen Simulation des DC-Netzverbunds und dessen Zusammenspiel mit dem AC-Netz. Die Ergebnisse des Verbundprojekts DC|hyPASim sollen es Firmen ermöglichen, eine verlässliche Voraussage der Machbarkeit und des Energieeinsparpotentials bei einer Teil- oder Gesamtumstellungen auf eine Gleichspannungsversorgung ihrer Produktionsanlagen zu erhalten. Die Projektlaufzeit beträgt drei Jahre und wird von einem Projektausschuss mit über 20 Partnern aus Industrie und Forschung begleitet.

Der im Rahmen des EnCN neu geschaffene Lehrstuhl für Leistungselektronik der Friedrich-Alexander-Universität bietet heute ein umfassendes Lehrangebot auf dem Gebiet der Leistungselektronik, darunter die Vorlesungen

- Leistungselektronik - Grundlagen
- Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang
- Leistungselektronik für dezentrale Energieversorgung – Gleichspannungsnetze
- Thermisches Management in der Leistungselektronik
- Elektrische Energiespeichersysteme und
- Zustandsdiagnostik technischer Isolierstoffe

zudem zwei Praktika und vier Seminare. Das Lehrangebot adressiert dabei eine breite Hörerschaft aus den Ingenieurwissenschaften, insbesondere Studierende der Studienrichtungen „Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik“ (EEI), Energietechnik, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen – sowie ab dem Sommersemester 2021 mit englischsprachigen Vorlesungen auch die Studienrichtung „Clean Energy Processes“.

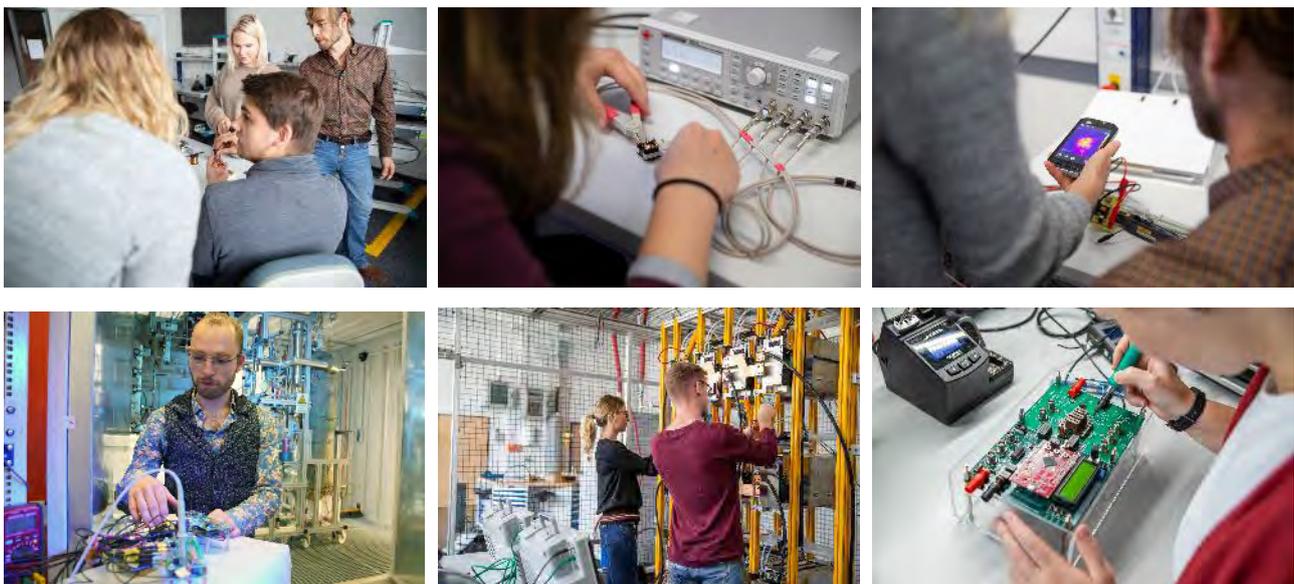


Abbildung 2: Impressionen aus dem Forschungsalltag

Insgesamt entstanden im Berichtszeitraum (2017 – 2021) 89 Publikationen und 10 Erfindungsmeldungen aus denen bis dato bereits 6 Patente erteilt wurden. In diesem Zeitraum konnten zudem 191 studentische Abschlussarbeiten (Bachelor-/Masterarbeiten) betreut und 17 Promotionsvorhaben abgeschlossen werden. Eine Reihe von Auszeichnungen, darunter der VDE-Bayern Award 2020, ein DRIVE-E-Studienpreis des BMBF und mehrere EnCN Energiepreise sind Beleg für das hohe Niveau der studentischen Arbeiten am LEE.



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.

## Ausblick

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

---

## Vorträge 2021

---

- [1] März M., Martin J., Öchsner R., Wunder B., Nuß A.: *Konzeptstudie für ein CO<sub>2</sub>-neutrales Energiesystem im ländlichen Raum*. Sitzung des Gemeinderats der Gemeinde Ahorntal, 12. August 2021

---

## Veröffentlichungen 2017 - 2021

---

- [1] V. Müller, R. Kaiser, S. Poller, D. Sauerteig, R. Schwarz, M. Wenger, V. Lorentz, M. März: *Introduction and application of formation methods based on serial-connected lithium-ion battery cells*. Elsevier Journal of Energy Storage, Sept. 2017
- [2] M. Maerz, B. Wunder, L. Ott: *LVDC-Netze – Herausforderungen und Perspektiven*. 7. ETG-Fachtagung Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, Bad Nauheim, April 2017
- [3] O. Kreuzer, M. Billmann, M. März: *A passively cooled 15 kW, 800 V DCDC-converter with a peak efficiency of 99.7%*. IEEE AFRICON, Kapstadt, Südafrika, 18-20. Sept., 2017
- [4] J. Kaiser, K. Gosses, L. Ott, Y. Han, B. Wunder, M. März, R. Weiss: *Grid Behavior under Fault Situations in  $\pm 380$  VDC Distribution Systems*. IEEE ICDCM, Nürnberg, 27.-29. June 2017
- [5] F. Fersterra, K. Gosses, M. Schulz, B. Wunder, M. März: *A Bidirectional Approach for Segregated DC Microgrids*. IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Nürnberg, 2017
- [6] S. Matlok, B. Eckardt, B. Seliger, M. Maerz: *Digital Control of Hard Switched Converters by Phase Modulated Pulse Width Modulation PMPWM*. PCIM Europe 2017, Nuremberg, 16-18 May 2017
- [7] J. Körner, S. Matlok, M. Hofmann, M. März: *Parasitic Inductance Analysis of a Fast Switching 100 kW Full-SiC Inverter*. PCIM Europe, Nuremberg, 16.-18. May 2017
- [8] J. Kaiser, K. Gosses, L. Ott, Y. Han, B. Wunder, M. März, F. Schork, K. Bühler, T. Böhm: *Safety Considerations for the Operation of Bipolar DC-Grids*. IEEE INTELEC, Gold Coast, 22.-26. Oct. 2017
- [9] B. Wunder, L. Ott, J. Kaiser, K. Gosses, M. Schulz, F. Fersterra, Y. Han, M. Lavery, M. März: *Droop Controlled Cognitive Power Electronics for DC Microgrids*. IEEE INTELEC, Gold Coast, 22.-26. Oct. 2017
- [10] A. Endruschat, T. Heckel, H. Gerstner, C. Joffe, B. Eckardt, M. März: *Application-Related Characterization and Theoretical Potential of Wide-Bandgap Devices*. IEEE WiPDA, Albuquerque, 2017
- [11] H. Gerstner, T. Heckel, A. Endruschat, B. Eckardt, M. März: *SiC Power Module Loss Reduction by PWM Gate Drive Patterns and Impedance-Optimized Gate Drive Voltages*. IEEE WiPDA, Albuquerque, 2017
- [12] Y. Han, J. Kaiser, L. Ott, M. Schulz, F. Fersterra, K. Gosses, B. Wunder, M. März: *High Efficiency Control Method for Non-Isolated Three-Port DC/DC converter*. PCIM Asia, Shanghai, June 2017
- [13] B. Ruccius, B. Preller, B. Wagner, M. Maerz: *An Advanced Control Concept for Modular Multilevel Converter using Capacitor Voltage Estimation*. 3rd Annual Southern Hemisphere Power Electronics Conf., Puerto Varas, Chile, 2017
- [14] A. Pai, T. Reiter, O. Vodyakho, I. Yoo, M. Maerz: *A Calorimetric Method for Measuring Power Losses in Power Semiconductor Modules*. EPE'17 ECCE EUROPE, Warsaw, Poland, 2017, DOI 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017. 8099017
- [15] V. Müller, V.R.H. Lorentz, R. Waller, S. Waldhör, M. Wenger, M. Gepp, R. Schwarz, S. Koffel, S. Wacker, M. Akdere, M. Giegerich, M. März: *Power Antifuse Device to Bypass or Turn-off Battery Cells in Safety-Critical and Fail-Operational Systems*, IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES 2018), New Zealand
- [16] S. Piepenbreier, A. Käß, M. März: *An Investigation of the Parasitic Impedance on the DC-Link Capacitor of EV Drive Inverters*. IEEE 10<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Stuttgart, 2018
- [17] T. Schriefer, M. Hofmann, M. März: *Vibrational resistance investigation of an IGBT gate driver utilizing Frequency Response Analysis (FRA) and Highly Accelerated Life Test (HALT)*. IEEE 10<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Stuttgart, 2018
- [18] T. Schriefer, M. Hofmann: *Assessing the vibrational response and robustness of electronic systems by dissolving time and length scale*. IEEE 19<sup>th</sup> Int. Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EurosimE), Toulouse, 2018
- [19] T. Schriefer, M. Hofmann, H. Rauh, B. Eckardt, M. Maerz: *Parameter study on the electrical contact resistance of axially canted coil springs for high-current systems*. 64<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, 2018

- [20] T. Heckel, S. Zeltner, B. Eckardt, M. Maerz. *Fast Switching with GaN and Dynamic On-Resistance from Application View-Point*. In "The 2018 GaN Power Electronics Roadmap", Journal of Physics D: Applied Physics 51(16), 2018
- [21] O. Kreutzer, M. Billmann, M. März: *Is an antiparallel SiC Schottky diode necessary - Calorimetric analysis of SiC MOSFETs switching behavior*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [22] H. L. Bach, Z. Yu, S. Letz, C. F. Bayer, U. Waltrich, A. Schletz, M. Maerz: *Vias in DBC Substrates for Embedded Power Modules*. 10<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) 2018, pp. 144-148
- [23] U. Waltrich, C. F. Bayer, S. Zötl, A. Tokarski, S. Zischler, A. Schletz, M. Maerz: *Highly Reliable Power Modules by Pressureless Sintering*. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) 2018, pp. 547-551
- [24] B. Eckardt, M. Wild, C. Joffe, S. Zeltner, S. Endres, M. Maerz: *Advanced Vehicle Charging Solutions Using SiC and GaN Power Devices*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [25] H. Gerstner, A. Endruschat, T. Heckel, C. Joffe, B. Eckardt, M. Maerz: *Non-linear Input Capacitance Determination of WBG Power FETs using Gate Charge Measurements*. IEEE 6<sup>th</sup> Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WIPDA), 2018, pp. 247-253.
- [26] J. Kaiser, F. Schork, K. Gosses, Y. Han, M. Schulz, L. Ott, B. Wunder, M. Maerz: *Converter Overvoltage Protection for DC-Grids*. IEEE 40<sup>th</sup> Int. Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2018.
- [27] A. Endruschat, Chr. Novak, H. Gerstner, Th. Heckel, Chr. Joffe, M. Maerz: *A Universal SPICE Field-Effect Transistor Model Applied on SiC and GaN Power Transistors*. IEEE Transactions on Power Electronics, Dec. 2018
- [28] P. Purgat, L. Mackay, M. Schulz, Y. Han, Z. Qin, M. Maerz, P. Bauer: *Design of a Power Flow Control Converter for Bipolar Meshed LVDC Distribution Grids*. IEEE 18<sup>th</sup> Int. Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest
- [29] K. Gosses, J. Kaiser, L. Ott, M. Schulz, F. Fersterra, B. Wunder, Y. Han, M. Lavery, M. Maerz: *Fault Considerations of Non-Isolated Electric Vehicle Chargers with a Mutual DC Supply*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [30] F. Schultheiss, N.-X. Thinh, A. Endruschat, M. Maerz: *Minimum Volume Design of a Forced-Air Cooled Three-Phase Power Factor Correction Stage for Electric Vehicle Chargers*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [31] O. Kreutzer, M. Billmann, M. Gerner, M. Maerz: *A 3.6 kV full SiC fuel cell boost converter for high power electric aircraft*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [32] A. Pai, T. Reiter, M. Maerz: *Efficiency Investigation of Full-SiC versus Si-based Automotive Inverter Power Modules at Equal Commutation Speed*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [33] L. Ott, Y. Han, B. Wunder, F. Bodensteiner, M. Maerz: *Evaluation of DC-DC-Converter Impedance Passivity using Pseudo-Random Test Signals*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [34] H. L. Bach, T. Endres, D. Dirksen, S. Zischler, C. F. Bayer, A. Schletz, M. Maerz: *Ceramic Embedding as Packaging Solution for Future Power Electronic Applications*. Int. Power Electronics Conference (ECCE IPEC) 2018, Niigata
- [35] Ott L., Schulz M., Wunder B., Maerz M.: *Investigation of Stability Issues in Droop-Controlled DC Microgrids with Intermediate Bus Architecture*. Proceedings International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, 2019
- [36] Schulz M., Kaiser J., Gosses K., Conz R., Maerz M.: *Bidirectional Bipolar Electronic Overcurrent Safety Element for Bipolar DC Grids*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, May 2019
- [37] Gepp M., Lorentz V.R.H., Maerz M., Geffray F., Guyon E., Chopard F.: *Spatial and Temporal Temperature Homogenization in an Automotive Lithium-Ion Pouch Cell Battery Module*. Electrimacs conference, Salerno, 2019
- [38] Diepgen A., Zimmermann V., Bayer C.F., Zhou Y., Forster C., Wilbers P., Leib J., Schletz A., Virtanen S., Maerz M.: *Parylene Coatings in Power Electronic Modules*. International Symposium on Advanced Power Packaging (ISAPP 2019)
- [39] Hutzler A., Fritsch B., Jank M. P. M., Branscheid R., Martens R. C., Spiecker E., Maerz M.: *In Situ Liquid Cell TEM Studies on Etching and Growth Mechanisms of Gold Nanoparticles at a Solid-Liquid-Gas Interface*. Advanced Materials Interfaces, 6 (20), Art. No. 1901027 (2019); ISSN: 2196-7350; DOI: 10.1002/admi.201901027
- [40] März M., Öchsner R.: *Innovative Technologien für intelligente dezentrale Energiesysteme*. Buch, 1. edition Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2019, ISBN: 978-3-8396-1486-0
- [41] Rettner C., Apelsmeier A., Jacob G., Maerz M., Schiedermeier M.: *Voltage ripple analysis based on DC-link current harmonics for Voltage Source Inverters*. IEEE COMPEL, Toronto, June 2019
- [42] Ruccius B., Kraus T., Westermann R., Heckel T., März M., Wagner B.: *A Cascaded Control Concept for Modular Multilevel Converters with Capacitor Voltage Estimation using a Kalman Filter*. ICPE 2019 - ECCE Asia - 10th

- International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Art. No. 8796897 (Busan, 2019) pp. 1198-1204; ISBN: 978-89-5708-313-0 / 978-1-7281-1612-9, ISSN: 2150-6086 / 2150-6078
- [43] Müller J., Novak M., Dresel F., Bayer C.F., Schletz A., Maerz M., Hofmann T.: *Selective Silver Sintering on Organic-Based Circuit Boards*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, May 2019
- [44] Bentheimer C., Islami A., Mainusch S., Hilpert F., Eckardt B., Maerz M.: *Highly efficient SiC inverter for aircraft application with innovative thermal management*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, May 2019
- [45] Jung S., Matlok S., Eckardt B., Maerz M.: *Analysis of a mixed transfer function and state space implementation of cascade control*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, May 2019
- [46] Angerer M., Amler A., Ruccius B., Maerz M.: *Multi-tap bus communication for modular power converters with distributed isolation*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, May 2019
- [47] Angerer M., Schwanninger R., Maerz M.: *Active common-mode filter for capacitive-coupled isolated signaling*. Electronics Letters, Oct. 2019, DOI: 10.1049/el.2019.2994
- [48] Matlok S., Boettcher N., Jahn M., Hörauf P., Erlbacher T., Eckardt B., Maerz M.: *Retrofitting Wide Band Gap Devices to classic Power Modules using Silicon RC Snubbers*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, May 2019
- [49] Ott L., Schulz M., Wunder B., Maerz M.: *Investigation of Stability Issues in Droop-Controlled DC Microgrids with Intermediate Bus Architecture*. Proceedings International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nürnberg, May 2019
- [50] Bach H. L., Dirksen D., Blechinger C., Endres T. M., Bayer C. F., Schletz A., Maerz M.: *Stackable SiC Embedded Ceramic Packages for High Voltage and High Temperature Power Electronics Applications*. IMAPS Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, & CICMT) online journal (Oxford, 2019) pp. 28-33; ISSN: 2380-4491; DOI: 10.4071/2380-4491.2019.HiTen.000028
- [51] Stolzke T., Ehrlich S., Joffe C., Maerz M.: *Comprehensive Accuracy Examination of Electrical Power Loss Measurements of Inductive Components for Frequencies up to 1 MHz*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 497:166022; DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166022
- [52] Schulz M., Ditzel S., Diller M., Han Y., Maerz M.: *An isolated bidirectional half-bridge active-clamp current-fed push-pull DC/DC converter for DC microgrid applications*. 21<sup>st</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe, Art. No. 8914806, DOI: 10.23919/EPE.2019.8914806
- [53] Schulz M., Wild M., Chacon R., Wunder B., Maerz M.: *A bidirectional and isolated DC/DC converter connecting mobile battery systems to a DC grid in commercial buildings*. IEEE IFEEC 2019, Singapore, November 2019
- [54] Hutzler A., Fritsch B., Jank M., Branscheid R., Martens R.C., Spiecker E., Maerz M.: *Nanoparticles: In Situ Liquid Cell TEM Studies on Etching and Growth Mechanisms of Gold Nanoparticles at a Solid-Liquid-Gas Interface*. Advanced Materials Interfaces 6(20), October 2019; DOI: 10.1002/admi.201970126
- [55] Kaiser J., Strobl C., Mann H., Muhm H., Klimpel M., Schork F., Maerz M.: *A Comprehensive Approach for Safety in DC-Microgrids*. IEEE ICDCM 2019, Matsue, May 2019
- [56] Schiedermeier M., Rettner C., Heilmann M., Schneider F., März M.: *Interference of Automotive HV-DC Systems by Traction Voltage-Source-Inverters (VSI)*. Int. Transportation Electrification Conference (ITEC 2019), Bangalore, India
- [57] Endruschat A., Novak C., Gerstner H., Heckel T., Joffe C., Maerz M.: *A Universal SPICE Field-Effect Transistor Model Applied on SiC and GaN Power Transistors*. IEEE Transactions on Power Electronics, 34 (9), Art. No. 8586977 (2019) pp. 9131-9145; ISSN: 0885-8993 / 1941-0107, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2889513
- [58] Ehrlich S., Joffe C., Tielke H., Leinfelder M., Maerz M.: *Comprehensive SPICE model for power inductor losses*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, Art. No. 8722180 (2019) pp. 1237-1244; ISBN: 978-1-5386-8330-9 / 978-1-5386-8331-6, ISSN: 2470-6647 / 1048-2334 ; DOI: 10.1109/APEC.2019.8722180
- [59] Kaiser J., Schork F., Gosses K., Han Y., Schulz M., Ott L., Wunder B., Maerz M.: *Converter Overvoltage Protection for DC-Grids*. INTELEC, International Telecommunications Energy Conference, 2018-October, Art. No. 8612423 (2019); ISBN: 978-1-5386-5370-8 / 978-1-5386-5371-5, ISSN: 0275-0473 / 2158-5210; DOI: 10.1109/INTLEC.2018.8612423
- [60] Kaiser J., Weiß R., Burk J.: *DC Microgrids for Commercial or Industrial Buildings*. Bodo's Power Systems, April 2019
- [61] Gerstner M., Dietz A., März M.: *Design of a Wide Input Voltage Range Current-Fed DC/DC Converter Within a Reduced Duty-Cycle Range*. 22<sup>nd</sup> European Conference on Power Electronics and Applications. 7-11 September 2020, Lyon (France)

- [62] 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*. 11<sup>th</sup> International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, Germany, 2020
- [63] 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
- [64] 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
- [65] S. Ehrlich, A. Rossmanith, 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
- [66] M. Gerstner, Dietz A., M. Maerz: *Reconfigurable Transformer for Wide Input Voltage Range DC/DC Converters*. IEEE 9<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)
- [67] 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
- [68] 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
- [69] 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)
- [70] 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
- [71] 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
- [72] 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*. 8<sup>th</sup> Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC 2020), Norway
- [73] 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
- [74] 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*. 11<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020
- [75] 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*. 11<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020
- [76] Rettner C., Schiedermeier M., Apelsmeier A., Maerz M.: *Fast DC-Link Capacitor Design for Voltage Source Inverters Based on Weighted Total Harmonic Distortion*. 35<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC 2020), New Orleans, March 2020, DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124581
- [77] Zimmermann V., Zörner A., Weiyl C., Yu Z., Jank M.P.M., Bayer C., Schletz A., Maerz M.: *Integration of Printed Electronics with Potted Power Electronic Modules*. 11<sup>th</sup> Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Berlin, 2020
- [78] Gerstner M., März M., Dietz A.: *Review-based Selection Recommendation for Galvanically Isolated DC/DC Converters Designed for a Wide Input Voltage Range*. Proc. IEEE 19<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2021, pp. 167-172.
- [79] Schiedermeier M., Schlampp F., Rettner C., März M.: *Analytical Calculation of the RMS Value and the Spectrum of the DC-Link Current of a Dual-Inverter*. IEEE Transactions on Power Electronics, Jan. 2022, Volume 37, Issue 1, pp. 782-794, Print ISSN: 0885-8993, Online ISSN: 1941-0107, Digital Object Identifier: 10.1109/TPEL.2021.3095520
- [80] Fritsch, Hutzler, Wu, Khandivianazar, Vogl, Jank, März, Spiecker: *Assessing local electron-beam induced temperature changes during in situ liquid-phase transmission electron microscopy*. Nanoscale Advances, Vol. 3, Issue 9, pp. 2466-2474, 2021
- [81] Yu, Xu, Letz, C. Bayer, Schletz, März: *Automated quantitative analysis of void morphology evolution in Ag-Ag direct bonding interface after accelerated aging*. ESREF 2021, Oktober 2021

- [82] Büttner S., Maerz M.: *Profitability of low-temperature power electronics and potential applications*. Cryogenics, 01/2022, DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103392
- [83] Liu X., Hofmann M., Streit F., Maerz M.: *Digital Twin for Intelligent and SiC-based Drive Systems*. Int. Electric Drives Production Conference (EDPC), December 2021
- [84] Liu X., Bentheimer C., Hilpert F., Hofmann M., Eckardt B., Maerz M.: *Digital Twin for a 10 MW Electrical Drive System for Future Electric Aircraft Applications*. Int. Electric Drives Production Conference (EDPC), December 2021
- [85] Yu Z., Ying Zhao T., Bayer C. F., Rauh H., Schletz A., Birlem O., Maerz M.: *Cu-Cu Thermocompression Bonding with Cu-Nanowire Films for Power Semiconductor Die-Attach on DBC Substrates*. IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2021
- [86] Yu Z., Letz S., Bayer C. F., Schletz A., Tian X., Maerz M.: *Automated Quantitative Analysis of Void Morphology Evolution in Ag-Ag Direct Bonding Interface after Accelerated Aging*. 32<sup>th</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF 2021, Bordeaux, DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114285
- [87] Geiling J., Steinberger M., Ortner F., Seyfried R., Nuss A., Uhrig F., Lange C., Oechsner R., Wasserscheid P., Maerz M., Preuster P.: *Combined dynamic operation of PEM fuel cell and continuous dehydrogenation of perhydrodibenzyl-toluene*. Int. Journal of Hydrogen Energy 46(2), Sept. 2021, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.034
- [88] Fritsch B., Hutzler A., Wu M., Vogl L., Jank M. P. M., Maerz M., Spiecker E.: *Beam-induced heating at low electron fluxes during liquid phase transmission electron microscopy*. Microscopy and Microanalysis 27(S1), August 2021, pp. 1040-1042, DOI: 10.1017/S1431927621003937
- [89] Hoerauf P., Endruschat A., Maerz M.: *Comparison Between Forced CCM and DCM on Low Load Efficiency of a SiC Based DC/DC Converter*. PCIM Europe digital days 2021; May 2021

## Erfindungsmeldungen, Patente 2017 - 2021

- [1] Malipaard D., Ruccius B., Maerz M.: *Current converter circuit*. US 10,581,341 B2; DE 10 2017 221 085 B (erteilt)
- [2] Schwanninger R., Angerer M., Maerz M.: *Aktiver Filter zur Filterung von Gleichtaktstörungen*. DE 10 2018 114 861 A1 (Offenlegung)
- [3] Bodensteiner F., Ott L., Wunder B.: *Vorrichtung und Verfahren zur Frequenzcharakterisierung eines elektronischen Systems*. EP 17178368.1 (Offenlegung)
- [4] Malipaard D., Hofmann A., Ruccius B., Galek M., Blum M.: *Ansteuerung für zellbasierte Umrichter*. Erfindungsmeldung
- [5] Waller R., Lorentz V., Maerz M.: *Elektrische Energiespeicherzelle mit integrierter Überbrückungseinrichtung*. EP 3 459 133 B1 (erteilt); US 10,892,466 B2 (erteilt)
- [6] Waller R., Lorentz V., Maerz M.: *Electrical bypass device for bypassing an electrical energy source or an energy consumer*. US 10,784,496 B2 (erteilt)
- [7] Wunder B., Zeilmann B.: *DC/DC-Wandler-Einrichtung sowie Steuer/Regel-System für ein Stromnetz*. Erfindungsmeldung
- [8] Zhou Y.: *Verfahren zum Ausbalancieren der Spannung in 4-Level Zwischenkreis für ZVS-Wechselrichter*. Erfindungsmeldung
- [9] Gehring J., Schwanninger R., Wunder B.: *Großsignal Induktivitätsmesssystem*. Erfindungsmeldung
- [10] Lorentz V., Maerz M., Wenger M.: *Arrangement having a multifunctional connection for energy storage cells or energy consumers*. US 20190131799A1 (erteilt)

## Promotionen 2017 - 2021

- [1] Sri Navaneethakrishnan Easwaran: *Fault Tolerant Design Techniques for Smart Power Drivers and Diagnostic Circuits*
- [2] Silke Kraft: *Entwicklung und Charakterisierung eines doppelseitig gekühlten leistungselektronischen Moduls*
- [3] Otto Kreuzer: *Untersuchungen zu nichtisolierenden bidirektionalen Hochvolt Hochvolt-DCDC-Wandlern mit Leistungsdichten jenseits von 100 kW/dm<sup>3</sup> auf Basis von SiC-Bauelementen*.
- [4] Martin Trautmann: *Untersuchung einer neuartigen Kommunikationsmethode für induktive Leistungsübertragungssysteme*

- [5] Erik Fischer: *Entwicklung und Verifikation eines messtechnischen Verfahrens zur orts aufgelösten Evaluierung dielektrischer Eigenschaften von Energieversorgungskabeln*
- [6] Aaron Hutzler: *Untersuchungen zur Lastwechselfestigkeit von Halbleiteranbindungen unter Hochtemperaturbelastung*
- [7] Christopher Joffe: *Modellbasierter Entwurf und Charakterisierung eines induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge*
- [8] Leopold Ott: *Modellbasierte Stabilitätsuntersuchungen in Niederspannungs-DC-Verteilnetzen*
- [9] Uwe Waltrich: *Optimierung von Hochspannungsleistungsmodulen für modulare Multilevel-Topologien unter Berücksichtigung von Lebensduraspekten*
- [10] Michael Steinberger: *Verstromung von wasserstoffreichen Gasgemischen mit PEM-Brennstoffzellen am Beispiel einer Epitaxieanlage*
- [11] Philipp Puls: *Simulationsgestützte Effizienzoptimierung von industriellen Kaltwassersystemen mit thermischen Speichern*
- [12] Jens Schmenger: *Ein Beitrag zu modularen und hochkompakten isolierenden Schnellladegeräten für Elektrofahrzeuge.*
- [13] Ajay Poonjal Pai: *Impact of Silicon Carbide based Power Modules on Mission Profile Efficiency of Automotive Traction Inverters.*
- [14] Patrick Hofstetter: *Hochausnutzung von Siliziumkarbid-Feldeffekttransistoren in Traktionsumrichtern*
- [15] Matlok Stefan: *Digitale Regelung bidirektionaler Gleichspannungswandler.*
- [16] Endruschat Achim: *Simulationsmodell für einen GaN-HEMT mit Schottky p-GaN-Gate*
- [17] Lange Christopher: *Energiesektoren-übergreifende Lastspitzenreduktion mit elektrischen und thermischen Energiespeichern*

---

## Abschlussarbeiten 2021

---

- [1] Abbasi, Mohammad: *Entwicklung und Bewertung von Betriebsstrategien zur Synchronisierung von automobilen Traktionsumrichtern*
- [2] Sodaigui, Wafaa: *Entwicklung eines Spice-Modells für Photovoltaikzellen zur Simulation der Verschattungsproblematik*
- [3] Best, Lukas: *Untersuchungen zum Einsatz von Nickel-Zink-Ferriten in Spannungswandlern mit hohen Schaltfrequenzen*
- [4] Utzelmann, Samuel: *Analyse eines für hohe Schaltfrequenzen konzipierten isolierenden Gleichspannungswandlers*
- [5] Fella, Matthias: *Entwicklung einer zur Vielfach-Parallelschaltung von GaN-Transistoren geeigneten Halbbrücken-Schaltzelle*
- [6] Schlachter, Marvin: *Simulation, Untersuchung und Kompensation der Drehmomentenvarianz zwischen den Rädern einer heckangetriebenen Twin-Achse*
- [7] Maunz, Ludwig: *Inbetriebnahme und Charakterisierung des Interleaved-Betriebs von Dual-Active-Bridge-Convertern*
- [8] Zhang, Xuelun: *Investigation of Laser Technology for Ceramic Substrate Manufacturing*
- [9] Li, Jiayu: *Inbetriebnahme und Bewertung einer modellprädiktiven Regelung für einen Dual-Active-Bridge-Converter auf Basis einer Lookup-Table Methode*
- [10] Sauer, Marco: *Untersuchung eines Transformators in planarer Bauweise am Beispiel eines resonanten Konverters*
- [11] Remhof, Markus: *Untersuchung des Einflusses von Leiterbahnführung und Masseanbindung auf die Eigenschaften eines EMV-Filters*
- [12] Schmidt, Timo: *Charakterisierung der Beständigkeit von TaC-Beschichtungen in Hinblick auf den Einsatz als Schutzschicht in der Gasphasenkristallzucht*
- [13] Sax, Julian: *Entwicklung eines Messplatzes zur Charakterisierung der Ausgangskapazität von Leistungshalbleitern*
- [14] Wagner, Simon: *Entwicklung eines Zustandsreglers für den bidirektionalen Betrieb seriell- und parallelverschalteter Gleichspannungswandler*
- [15] Laugner, Manuel: *Untersuchung eines Resonanzwandlers in seinem lastunabhängigen Betriebspunkt*
- [16] Wagner, David: *Evaluierung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Systems für einen Leistungsbereich um 25 kW*

- [17] Schindler, Laura: *Konzipierung eines hochautomatisierten HiL-Prüfstandes für Automotive-Brennstoffzellen auf der Basis vorhandener HV-Batterieprüfstände*
- [18] Spitz, Maximilian: *Untersuchung der Flying-Cap Topologie als Boost-Converter für Brennstoffzellenapplikationen*
- [19] Amler, Adrian: *Analyse eines isolierenden Gleichspannungswandlers mit kapazitiver Kopplung für den Betrieb mit hoher Schaltfrequenz*
- [20] Landry, Biawa Kameni: *Charakterisierung von Ansteuerverfahren für die Regelung von permanenterregten Synchronmaschinen in Luftfahrtanwendungen*
- [21] Walch, Daniel: *Untersuchung der Merkmalsextraktion und maschineller Lernverfahren zur Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben*
- [22] Seidenath, Manuel: *SPICE-Modellierung von Schmelzsicherungen unter Berücksichtigung der Lichtbogenproblematik*
- [23] Meindl, Markus: *Reverse Engineering des Wasserstoffsystems eines kommerziellen Brennstoffzellenfahrzeugs*
- [24] Bayer, Svenja: *Simulative Untersuchung von aktiven Common-Mode Filtern*
- [25] Freundl, Patrizia: *Entwicklung eines Regelungskonzepts für einen Gegentaktwandler im RF-Frequenzbereich*
- [26] Qin, Yichun: *Development of an Optimization Algorithm for Multi-Objective Optimization of Building Energy Infrastructure*
- [27] Gundermann, Cosima: *Entwicklung und Vereinheitlichung von Betriebsstrategien für Komponenten aus der energetischen Gebäudeinfrastruktur*
- [28] Bayer, Florian: *Untersuchung des dynamischen Ein-Widerstands von GaN-HEMT bei tiefen Temperaturen unter Berücksichtigung harter und weicher Schaltvorgänge*
- [29] Song, Jiekun: *Untersuchungen zur Implementierung von Droop-Regelungen bei zweistufiger Anbindung bidirektionaler Lasten an ein bipolares DC-Netz*
- [30] Ronge Patrizia: *Konstruktion und Inbetriebnahme eines Dreipunkt-SiC-Umrichters*
- [31] Assmy, Jan-Lukas: *Entwicklung eines Tools zur automatisierten Simulation und Überprüfung der Stabilität von DC-Netzen*
- [32] Sauer, Adrian: *Thermisches Management von Leistungselektronik über CFK-Strukturen in Multicoptern*
- [33] Wieder, Yvonne: *Konzepte zur Drehmomentschätzung und -regelung*
- [34] Lehmeier, Thomas: *Untersuchung spektral optimierter Steuerverfahren anhand eines Dreipunkt-Stromrichters am Gleichspannungszwischenkreis*
- [35] Blamberger, Lukas: *Entwicklung einer Schaltung zum zyklischen Umladen von Kondensatoren für Lebensdauertests*
- [36] Müller, Torsten: *Design und Simulation der Regelung einer 4x3-phasigen 10 MW e-Maschine mit je 3-fach interleaved taktenden Umrichter-Halbbrücken pro Phase*
- [37] Schröder, Jacqueline: *Bedarfsbezogene Standortwahl für die Ladeinfrastruktur im Großraum Erlangen*
- [38] Sengpiel, Adrian: *Echtzeitfähige Positionsbestimmung von Waren in der Intralogistik mittels UHF-RFID*
- [39] Pauls, Denis: *Analysis and design of an integrated single-stage on-board charger and DC/DC converter*
- [40] Briegleb, Lukas: *Entwicklung und Charakterisierung eines bidirektionalen hybriden Schutzschalters für DC-Anwendungen*
- [41] Nistler, Eva: *Untersuchungen zur modellprädiktiven Regelung eines vereinfachten Dreipunktstromrichters*

# W1-Professur „Energieinformatik“

Die Besetzung der W1-Professur für Energieinformatik erfolgte im April 2016 durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung innovativer Methoden für die Modellierung, Optimierung und Simulation komplexer Energiesysteme auf verschiedenen Ebenen. Dabei spielt sowohl die Planung als auch die Steuerung und die Betriebsführung von Energiesystemen eine große Rolle. Zusätzlich befasst sich Herr Pruckner mit der Systemintegration der Elektromobilität sowohl im Bereich des Individual- als auch öffentlichen Personennahverkehrs.

## 1 W1-Professur „Energieinformatik“

### 1.1 Energiesystemanalyse

Im Bereich der Energiesystemanalyse wurde in den Jahren 2017-2019 das im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramm geförderte Forschungsprojekt KOSiNeK - Kombinierte Optimierung Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext - bearbeitet. Dabei wurden im Teilprojekt Simulation ein hochaufgelöstes Regionenmodell zur Modellierung und Simulation der Residuallast auf Landkreisebene als auch ein agentenbasiertes Marktmodell zur blockscharfen Kraftwerkseinsatzplanung entwickelt. In Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Wirtschaftsmathematik und Elektrische Energiesysteme ist eine ganzheitliche Betrachtung verschiedener Szenarien für den Energieumstieg in Deutschland möglich. Resultate zeigen, dass Deutschland von einem Stromexportland zu einem Stromimporteur im Jahr 2030 werden wird. Darüber hinaus können durch den starken Ausbau erneuerbarer Energieträger die CO<sub>2</sub> Emissionen deutlich reduziert werden.

Im Jahr 2021 wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms das Nachfolgeprojekt ESM-Regio - Mehrsektorale gekoppelte Energiesystemmodellierung auf regionaler Ebene bewilligt. In diesem Projekt beschäftigen sich mehrere Forschungspartner mit der Sektorkopplung auf regionaler Ebene am Beispiel der Stadt und des Landkreises Bayreuth. Ziel der Juniorprofessur ist es ein detailliertes Modell für den Verkehrssektor zu entwickeln, so dass die Flexibilitätsoptionen durch elektrifizierte Fahrzeugflotten entsprechend quantifiziert werden können.

Im Bereich der Energiesystemanalyse konnte im Jahr 2020 eine ältere Version des Energiesystemanalysemodells erfolgreich auf das Energiesystem der kanadischen Provinz Alberta angepasst werden, um in einer internationalen Kollaboration Analysen zu den Auswirkungen einer großen Anzahl an Elektrofahrzeugen auf die Energieerzeugung und Treibhausgasemissionen in Alberta zu tätigen. Die Arbeit wurde im Journal Applied Energy publiziert [11].

### 1.2 Systemintegration Elektromobilität

Im Bereich der Systemintegration Elektromobilität konnten in der Förderperiode zahlreiche wissenschaftliche Projekte durchgeführt werden, die sich sowohl mit dem Ausbau der Ladeinfrastruktur, intelligenten Ladealgorithmen als auch mit methodischen Ansätzen zur Beschreibung von Flexibilität und Batteriealterungsmechanismen befassen.

Beispielsweise wurde im Jahr 2017 im Auftrag des bayerischen Wirtschaftsministeriums ein Simulationswerkzeug für die zeitliche und räumliche Ausbauplanung für Ladeinfrastruktur in Bayern erstellt. Dabei wurden Informationen der vorhandenen Ladeinfrastruktur in Bayern ausgewertet und ein diskretes Ereignissimulationsmodell erstellt [2].

## 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

Die intelligente Steuerung von Ladeereignissen kann einen erheblichen Beitrag leisten, um Lastspitzen zu vermeiden und Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien besser in das Energiesystem zu integrieren. Dies wurde in zahlreichen Projekten demonstriert. Beispielsweise wurden koordinierte Ladestrategien zur Minimierung der Kosten oder der Maximierung der Netzdienlichkeit entwickelt [9]. Dies mündete auch in einer internationalen Kollaboration mit der UC Berkeley (USA) [12]. Neue, methodische Ansätze beinhalten beispielsweise auch Ladestrategien auf Basis von Reinforcement Learning. Im Gegensatz zu modellbasierten Ansätzen werden hier Parameter wie Abfahrtszeiten oder benötigte Energiemengen für die Bewältigung der nächsten Fahrt nicht benötigt [18].

Um in Zukunft Systemdienstleistungen, wie z.B. Primärregelleistung, durch eine große Flotte von Elektrofahrzeugen bereitstellen zu können, bedarf es Konzepte zur Beschreibung der Verfügbarkeit von Flexibilität. Dazu ist es notwendig sowohl die Ankunfts- als auch Abfahrtszeiten als auch die benötigten Energiemengen zu kennen. Aus diesem Grund haben wir auf Grundlage des Berichts Mobilität in Deutschland ein umfangreiches Mobilitätsverhaltensmodell entwickelt. Mit Hilfe dieser Informationen haben wir anschließend eine Methodik zur Beschreibung der Flexibilität entwickelt, die auch Gegenstand der Dissertation von Jonas Schlund (2021) war [13].

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 [16][17].

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 [19].

### 1.3 Steuerung intelligenter Energiesysteme

Im Bereich der Steuerung intelligenter Energiesysteme befassen wir uns mit dem Einsatz von Reinforcement Learning zur Steuerung verschiedener Anlagen (z.B. Batteriespeicher, BHKWs) in sogenannten Energy Communities. Dabei haben wir zunächst mit einer Single Agent Framework begonnen und über die Jahre zu einem Multi-Agenten-System weiterentwickelt, so dass mehrere Haushalte innerhalb der Community Energie austauschen können. Die Agenten verhalten sich dabei kooperativ, so dass der Netzbezug der Community insgesamt reduziert werden soll. Mithilfe des Frameworks können Untersuchungen auf einer Detailebene von Leistungsflüssen in zeitlichen Auflösungen von bis zu fünf Minuten zur koordinierten Schwarmintelligenz verschiedener Prosumenten (siehe Abbildung 1) im elektrischen Verteilnetz durchgeführt werden. Auch die Abbildung von Nichtlinearitäten, wie beispielsweise des Wirkungsgrades eines Umrichters, sind möglich. Vergleiche von erlernten dezentralen Betriebsstrategien mit Verfahren der linearen Programmierung sowie regelbasierten Ansätzen helfen der Einordnung der erreichten Leistungsfähigkeit der verwendeten Ansätze. Die mögliche Überführung des Multi-Agenten Systems in ein zentrales System gibt darüber hinaus Einsicht, in welchem Umfang eine Kommunikation zwischen den dezentralen Agenten die Performanz des selbstlernenden Algorithmus verbessern kann.

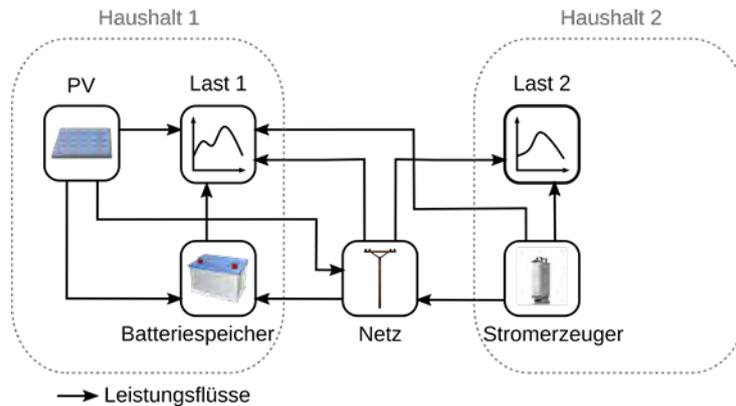


Abbildung 1: Systemkonfiguration mit zwei Haushalten und unterschiedlichen Komponenten zur Stromerzeugung und -speicherung

Im Jahr 2021 konnte zusätzlich im Rahmen des Bayerischen Verbundforschungsprogramms das Projekt DigiSWM zusammen mit der Universität Bamberg, Stadtwerk Haßfurt GmbH, Consolinno GmbH und Ben Energy akquiriert werden. Hauptaufgabe der Juniorprofessur wird es sein ein Simulationsframework zur Identifikation der Potentiale von Haushalten zur Erbringung von Systemdienstleistungen im virtuellen Kraftwerksverbund zu quantifizieren. Hierbei sollen auch maschinelle Lernverfahren zur Steuerung der Anlagen erprobt werden.

## 1.4 Nachwuchsförderung

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem Gebiet der Energieinformatik wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Gegenwärtig werden drei Lehrveranstaltungen angeboten. 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.

An der Juniorprofessur für Energieinformatik wurden über den Förderzeitraum mehr als 40 studentische Abschlussarbeiten betreut. Zusätzlich betreute Prof. Pruckner fünf Dissertationsprojekte.

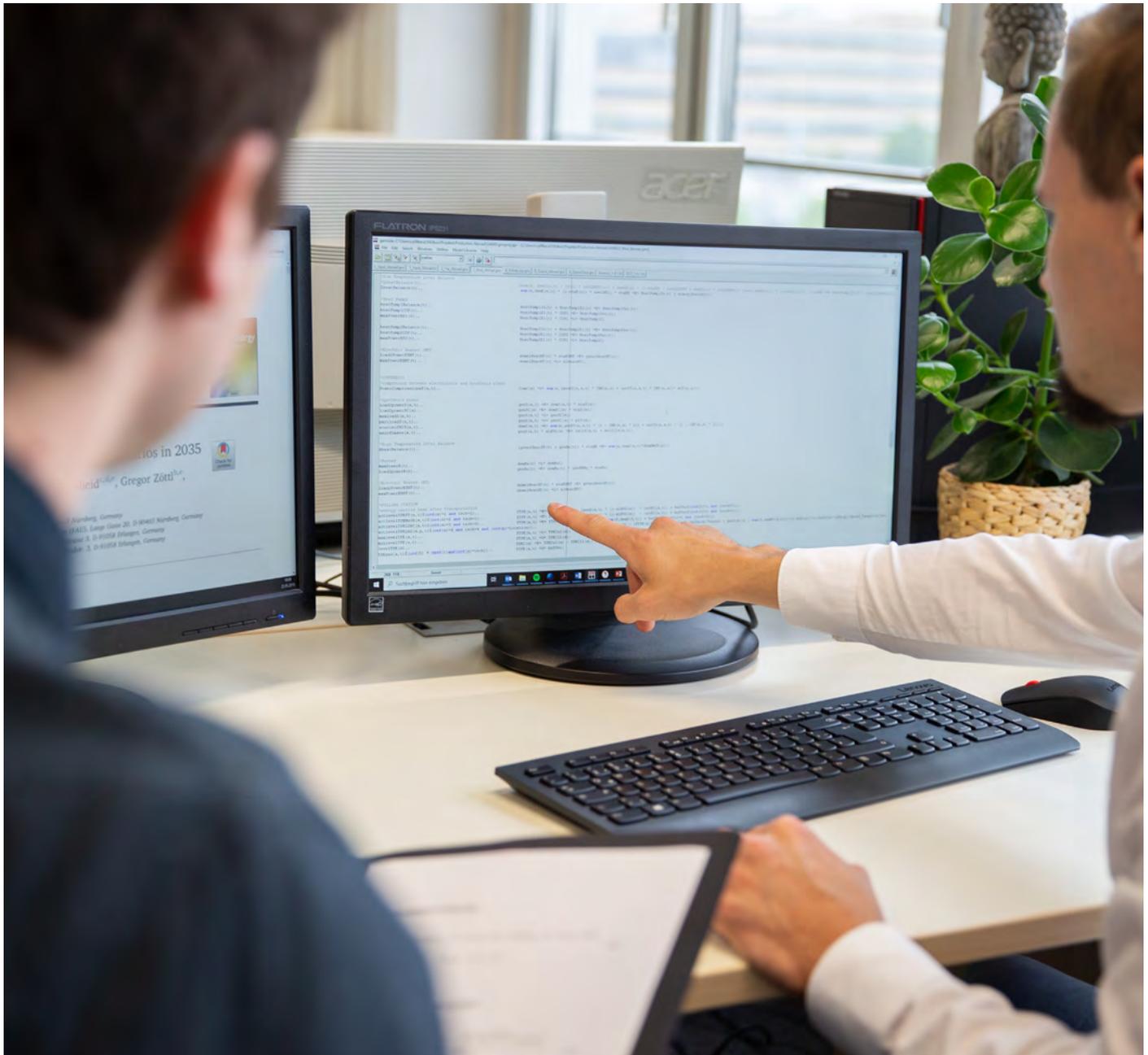
## 2 Veröffentlichungen

- [1] D. Steber, M. Pruckner, J. Schlund, P. und R. German. Including a virtual battery storage into thermal unit commitment. Computer Science - Research and Development, 2017
- [2] M. Pruckner, R. German und D. Eckhoff. Spatial and Temporal Charging Infrastructure Planning Using Discrete Event Simulation. 2017 Annual ACM Conference on SIGSIM Principles of Advanced Discrete Simulation (SIGSIM-PADS '17), Singapore, Mai 2017
- [3] P. Dicke, B. Meyer und M. Pruckner. Electrification of Public Bus Transport under the Usage of Electricity Generated by Renewables. 2017 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), Singapore, Republic of Singapore, 2017
- [4] D. Steber; J. Hübler; M. Pruckner. A Comprehensive Electricity Market Model Using Simulation and Optimization Techniques, Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Göteborg, 2018.
- [5] J. Schlund; R. Steinert; M. Pruckner. Coordinating E-Mobility Charging for Frequency Containment Reserve Power Provision, Proceedings of the 9th International Conference on Future Energy System, Karlsruhe, 2018.
- [6] P. Bazan; A. Djanatliev; Ch. Lauer; M. Pruckner; R. German. Rebalancing and Fleet Sizing of Mobility-on-Demand Networks with Combined Simulation, Optimization and Queueing Network Analysis, Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Göteborg, 2018.

- [7] N. Ebell; M. Pruckner. Coordinated Multi-Agent Reinforcement Learning for Swarm Battery Control, Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec, 2018.
- [8] N. Ebell; F. Heinrich; J. Schlund; M. Pruckner. Reinforcement Learning Control Algorithm for a PV-Battery-System providing Frequency Containment Reserve Power, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Control and Computing Technologies for Smart Grids, Aalborg, 2018.
- [9] M. Spitzer, J. Schlund, E. Apostolaki-Iosifidou, M. Pruckner: Optimized Integration of Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Grids, *Energies* 12 (2019)
- [10] N. Ebell, M. Gütlein, M. Pruckner: Sharing of Energy Among Cooperative Households Using Distributed Multi-Agent Reinforcement Learning, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Bucharest, 2019.
- [11] 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
- [12] 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)
- [13] 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
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] F. Heinrich, P. Klapper, M. Pruckner: A Comprehensive Study on Battery Electric Modeling Approaches Based on Machine Learning, *Energy Informatics* 4 (3), p. 1-17, 2021
- [17] F. Heinrich, F. Noering, M. Pruckner, K. Jonas: Unsupervised Data-preprocessing for Long Short-Term Memory Based on Battery Model under Electric Vehicle Operation, *Journal of Energy Storage* 38, 2021
- [18] F. Tuhnitz, N. Ebell, J. Schlund, M. Pruckner: Development and Evaluation of a Smart Charging Strategy for an Electric Vehicle Fleet Based on Reinforcement Learning, *Applied Energy* 285, 2021
- [19] R. Iacobucci, J. Donhauser, J.-D. Schmöcker, M. Pruckner: Frequency Control Reserve Provision from a Fleet of Shared Autonomous Electric Vehicles, *7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, 2021 (virtuell)

FORSCHUNGSBEREICH

# Energiemarktdesign



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail  
[veronika.grimm@fau.de](mailto:veronika.grimm@fau.de)

Telefon  
+49 911 / 5302 224

Web  
[www.encn.de/markt](http://www.encn.de/markt)

# ENERGIEMARKTDESIGN

## Projektbericht 2017 - 2021

Im Projekt „Energiemarktdesign“ des EnCN<sup>2</sup> befasste sich ein Team aus Ökonomen, Mathematikern und Juristen mit den wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Transformation des Energiesystems. Ziel war es, Methoden der Energiemarktmodellierung und die notwendigen mathematischen Algorithmen zu entwickeln sowie mit fundierten Analysen zum energiepolitischen Diskurs in Deutschland und Europa beizutragen.

Im Bereich des **Strommarktes** lagen die Schwerpunkte insbesondere auf der Steuerungswirkung des Marktdesigns für privatwirtschaftliche Investitionen und dem regulierten Netzausbau. Von besonderer Bedeutung war dabei die Identifikation von zukunftsfähigen Rahmenbedingungen auf Verteilnetzebene, die Geschäftsmodelle regionaler Stakeholder und Flexibilitätsoptionen möglich machen. Für die Analyse komplexer ökonomischer Fragestellungen in Energiemarktmodellen wurden mathematische Techniken erarbeitet, um die Lösbarkeit der betrachteten Modelle zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde 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 galt dabei dezentralen Ansätzen, die auch Geschäftsmodelle regionaler Akteure im urbanen und ländlichen Raum mitdenken. Im Bereich der **Gasmarktanalyse** wurden 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 worden. Auf Basis der grundlegenden methodischen Resultate des TRR 154 wurden im EnCN<sup>2</sup> realitätsnahe Modelle kalibriert und analysiert. Außerdem wurden Modelle für eine integrierte Betrachtung der Änderungen im Strom- und Gasmarkt design entwickelt und deren gemeinsame Auswirkungen auf das künftige Energiesystem untersucht. Zentrale Fragen stellen sich hier 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 Energiesystems erfolgte insgesamt eine engere Verzahnung der Teilprojekte des Projekts Energiemarktdesign. Dadurch konnten Kapazitäten zur Analyse von zentralen Forschungsfragen zu integrierten Energiemärkten (Strom, (Erd-)gas und Wasserstoff) mit mehrstufigen Marktmodellen aufgebaut werden. Im Bereich **Mobilität** wurde die Interdependenz von nachhaltiger Mobilität mit dem Stromsektor analysiert. Dabei lag das Augenmerk auf der batterieelektrischen Mobilität sowie (in Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B) auf der Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzellen und anderen nachhaltigen Kraftstoffen. Durch dieses Themenspektrum konnte die Transformation des deutschen Energiesystems als Teil des europäischen Binnenmarkts und des weltweiten Energiemarktes sowie dezentrale Energiemärkte an der Schnittstelle zu innovativen Konzepten in der Mobilität und in der Wärmeversorgung untersucht werden.

### 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



Abbildung 1: Das Team Energiemarktdesign am Energie Campus Nürnberg.

Im Rahmen des Projekts Energiemarktdesign im EnCN<sup>2</sup> wurden in den Jahren 2017–2021 über 80 wissenschaftliche Arbeiten in hochrangigen internationalen Zeitschriften publiziert oder als Preprint fertiggestellt, über zehn Dissertationen erfolgreich abgeschlossen und zahlreiche Gutachten und Stellungnahmen vorgelegt. Es konnten 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 (BMFV) 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 Sektorkopplung zwischen den EnCN-Forschungsbereichen Energiemarktdesign und Speicher (B) führten in 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 Unternehmen, Verbänden und Forschungseinrichtungen („Wasserstoffbündnis Bayern“) die Grundlage für einen bayerischen Strategieprozess im Bereich Wasserstoff. Die Bayerische Wasserstoffstrategie wurde im Mai 2020 von der Staatsregierung vorgestellt. Diese sieht unter anderem die Ausarbeitung einer Bayerischen Wasserstoff-Roadmap vor, die durch das H2.B erarbeitet werden soll. Nach einem erfolgreichen Auftakt 2020 fand auch 2021 der Hydrogen Dialoge in Kooperation mit der Nürnberg Messe statt. Mit den Aktivitäten des H2.B erhielten 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 gemeinsame Industrieprojekte bearbeitet worden.

Durch das internationale Doktorandenkolleg „Evidence Based Economics“ (gemeinsam mit der LMU München und der Universität Regensburg, Koordination in Nürnberg: Prof. Dr. Veronika Grimm) und das europäische Marie-Curie Innovative Training Network MINOA (Kordinatorin: Prof. Dr. Frauke Liers) zur gemischt-ganzzahlig nichtlinearen Optimierung erfolgte 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 wurde eine enge Kooperation mit den ehemaligen EnCN-EMD-Mitgliedern Prof. Dr. Martin Schmidt (Uni Trier) und PD Dr. Lars Schewe (University of Edinburgh) erhalten und neue Kooperationen, wie mit Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh)

und Prof. Dr. Miguel Anjos (University of Edinburgh/Polytechnique Montréal) aufgebaut. Dr. Harry van der Weijde hat von der Alexander von Humboldt-Stiftung ein angesehenes Humboldt-Forschungsstipendium erhalten und verstärkte in 2021 den Bereich EMD mit der Analyse von Risiken in verbraucherorientierten Energiemärkten. Die öffentliche Wahrnehmung und wissenschaftliche Vernetzung des EnCN profitierte wesentlich von der aktiven Teilnahme an internationalen Konferenzen mit über 230 Vorträgen sowie von der Durchführung von internationalen und nationalen Workshops und Seminaren in Nürnberg. Hervorzuheben sind hierbei die Nürnberg-München-Berlin Energy Workshops, eine gemeinsame Konferenz zum Thema Wasserstoff mit dem Mannheim Institut for Sustainable Energy Systems (MISES) und die umfangreiche Teilnahme mit Postern und Vorträgen an den jährlichen Veranstaltungen Lange Nacht der Wissenschaften in der Metropolregion Nürnberg. Mit Beginn der Corona Pandemie wurden die EMD Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlicher vor große Herausforderungen gestellt und geplante Formate der Zusammenarbeit und des wissenschaftlichen Austausches konnten nicht realisiert werden konnten. Im Gegenzug profitierte der EnCN 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 profitierte in hohem Maße von den Aktivitäten am EnCN. Es wurden über 110 Abschlussarbeiten für Bachelor- und Masterstudierend betreut, von denen mehrere mit dem EnCN-Energiepreis ausgezeichnet worden. Ein breites Spektrum mathematischer, ökonomischer und juristischer Vorlesungen und ein Seminar in Kooperation mit Partnern aus der regionalen Wirtschaft boten den Studierenden verschiedener Studienrichtungen außerdem ein umfangreiches Lehrangebot zu Herausforderungen in der Energiewirtschaft. Aufbauend auf einer Lehrveranstaltung verfassten PD Dr. Lars Schewe und Prof. Dr. Martin Schmidt das Lehrbuch „Optimierung von Versorgungsnetzen. Mathematische Modellierung und Lösungstechniken“, das 2019 im Springer-Verlag erschienen ist.

# 1 Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten

## Modellierung von Strommärkten

Im ersten Teilprojekt „Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten“ arbeiteten Mathematiker und Volkswirte an der mehrstufigen Modellierung von Strommärkten sowie an der Entwicklung von mathematischen Verfahren für deren Lösung. Im Fokus standen die Entscheidungen der verschiedenen Akteure im liberalisierten Strommarkt, die in mehrstufigen Gleichgewichtsmodellen analysiert worden (Abbildung 2). Dabei wurde 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 hatte bereits in der ersten Förderphase des EnCN wesentlich zur Entwicklung eines mehrstufigen Strommarktmodells beigetragen und wurde in der zweiten Förderphase mit einer Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu theoretischen und angewandten Forschungsfragen erfolgreich fortgesetzt. Durch Master- und Bachelorarbeiten zu mathematischen, ökonomischen und juristischen Fragestellungen, konnten Studierende der FAU Erlangen-Nürnberg in die Forschung am EnCN mit eingebunden werden. Auch wurden mehrstufige Modellansätze mit der Kopplung von Strommärkten mit Gasmärkten, Wasserstoffmärkten und mit batterieelektrischer Mobilität entwickelt (Egerer et al., 2021 [70], Schwab et al., 2021 [82]). Im Bereich Sektorkopplung und Wasserstoffwirtschaft gab es in der zweiten Förderphase am EnCN eine erfolgreiche Kooperation mit den Ingenieurwissenschaften aus dem Projekt Speicher B (Runge et al., 2020 [80], Runge et al., 2019 [56]). Im Rahmen des Verbundprojekts EOM-Plus (7. Energieforschungsprogramms des BMWi) betrachten 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 marktbasierter Engpassinstrumenten als regionale und temporäre Ergänzung zum bestehenden Energy-Only-Strommarktdesign. Im Kontext der Diskussion zur CO<sub>2</sub>-Abgabe als Teil des Klimaschutzpakets der Bundesregierung wurden im Projekt EMD aus juristischer Sicht Möglichkeiten sozialverträglicher CO<sub>2</sub>-Preise untersucht (Ismer et al., 2019 [37]). Für die internationale Perspektive beschäftigten sich Ismer (2020) [38] und Ismer, Neuhoff und Pirlot (2020) [75] mit Ansätzen für CO<sub>2</sub>-Preise auf Produkte die in den europäischen Binnenmarkt importiert werden. Darüber hinaus haben Garnadt, Grimm und Reuter (2020) [71] die in internationalen Handelsströmen eingebetteten CO<sub>2</sub>-Emissionen näher untersucht und ausführlich mögliche Ausgestaltungen eines CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichs vor diesem Hintergrund diskutiert.

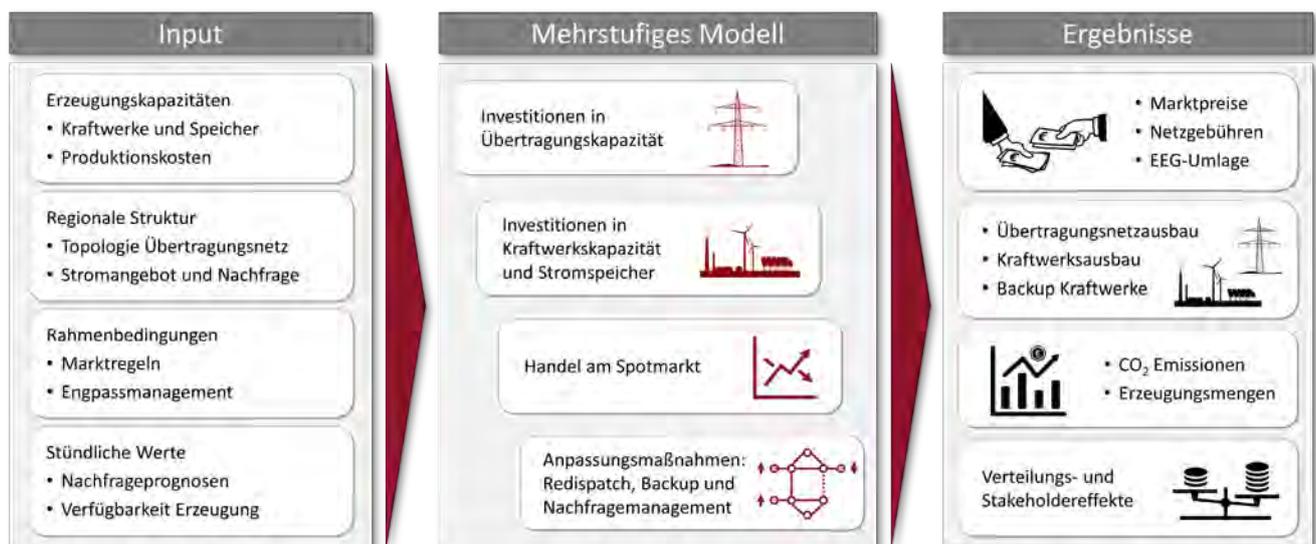


Abbildung 2: Mehrstufige Modellierung von Strommärkten am Energie Campus Nürnberg. Eigene Darstellung.

## Anwendungen und Weiterentwicklung der Methoden

In der zweiten Förderphase des EnCNs wurden verschiedene Fragen der energiepolitischen Diskussion in Deutschland detailliert beleuchtet. Für die Betrachtung des deutschen Strommarktes wurde das „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Modell genutzt, das mit geeigneten Daten für die Szenarien des Netzentwicklungsplans kalibriert ist (Ambrosius et al., 2021 [65], 2019 [66]). In verschiedenen Beiträgen konnte gezeigt werden, dass Anpassungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen, z. B. die Einführung einer zweiten deutschen Preiszone (Ambrosius et al., 2020 [4]; Grimm et al., 2019 [20]) oder die Abregelung von Erneuerbaren Energien durch Einspeisemanagement (Grimm et al., 2021 [24]), zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und Einsparungen beim Netzausbau führen können. Grimm et al. (2019) [25] untersuchten mit Hilfe des GATE Modells die Einführung einer regional differenzierten Netzentgeltkomponente (G-Komponente) zur Generierung regionaler Investitionsanreize und zeigten, 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. 2022 [22]) zeigte, 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 analysierten Grimm et al. (2021) [73] die Fragestellung, welchen Einfluss Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf den optimalen Ausbau konventioneller und erneuerbarer Energien haben. Die dabei betrachteten Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emission sind ein gesetzlich festgelegter Kohleausstieg bis 2035 und die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Stromsektor, z. B. mittels Einführung eines nationalen Mindestpreises für den Europäische Emissionshandel.

Für den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger 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 [8]). 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 worden. 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.

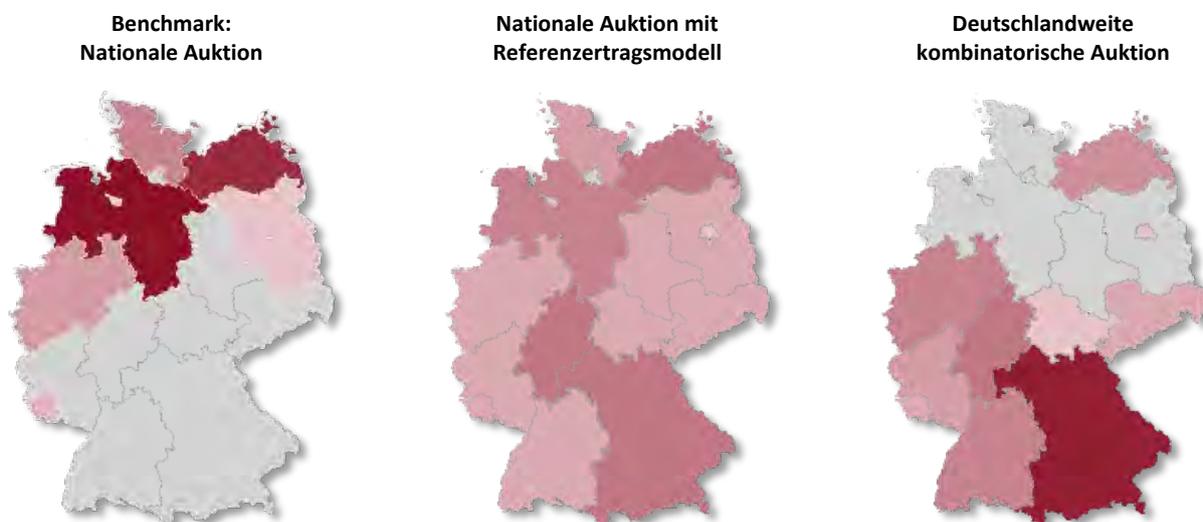


Abbildung 3: Regionale Verteilung neuer Windkraftanlagen in Deutschland mit einer Leistung von insgesamt 2600 MW für verschiedene Ausschreibungsregimes. Vgl. Bichler et al. (2020) [8].

Ein weiteres Forschungsthema im Teilprojekt war 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) [3] untersuchten 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 konnte in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung am Beispiel einer möglichen Einführung von Preiszonen als Quelle der Unsicherheit detailliert analysiert werden. Es zeigte 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 entwickelten Ambrosius et al. (2021) [2] ein stochastisches mehrstufiges Gleichgewichtsmodell mit risikoaversen Agenten, das Investitionen in Übertragungs- und Erzeugungskapazität abbildet. Sie konnten 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) [77] und Krebs, Müller und Schmid (2019) [78] 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) [29], 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. (2021) [14] eröffneten durch eine Abbildung von Nachbarmärkten in mehrstufigen Marktmodellen die Grundlage, regionale Ausbauentscheidungen in einem integrierten Strommarkt zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigten, 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. (2021) [1], (2020) [64] beschäftigten sich mit dem optimalen Betrieb von Stromnetzen. Aigner et al. (2020) [64] behandelten das AC Strommodell, während in Aigner et al. (2020) [1] robuste sichere Approximationen für die Vermeidung von Überlastung bei unsicherer Solareinspeisung im DC Modell angegeben worden. Klassische Lösungsverfahren für mehrstufige Optimierungsprobleme verwenden oft eine so genannte BigM-Linearisierung. In Kleinert et al. (2020) [42] wurde gezeigt, dass darauf basierende Verfahren in der Praxis oft nicht verwendet werden können. In Kleinert und Schmidt (2020) [43] (2019) [44] wurden deshalb Alternativen zur BigM-Linearisierung diskutiert, z. B. wurde eine Heuristik für zweistufige Optimierungsprobleme vorgestellt, die ohne eine solche Linearisierung auskommt. Kleinert et al. (2020) [41] beschrieben und testeten 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) wurden synthetische Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als nachhaltige Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft untersucht. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Auswirkungen verschiedener Strommarktdesigns auf den Produktionskosten der Kraftstoffe. Runge et al. (2020) [80] und Runge et al., 2019 [56] untersuchten das globale Potential nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe, da diese CO<sub>2</sub>-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 wurden 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 kann auch Elektrolyse auf regionaler Ebene in Deutschland einen Beitrag leisten. Zur Untersuchung von Interaktionen zwischen Strom- und Gasmärkten und zukünftigen Wasserstoffmärkten in Deutschland wurde ein Marktmodell für mehrere Energiemärkte

entwickelt (Abbildung 4). Egerer et al. (2021) [70] beschrieben 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.

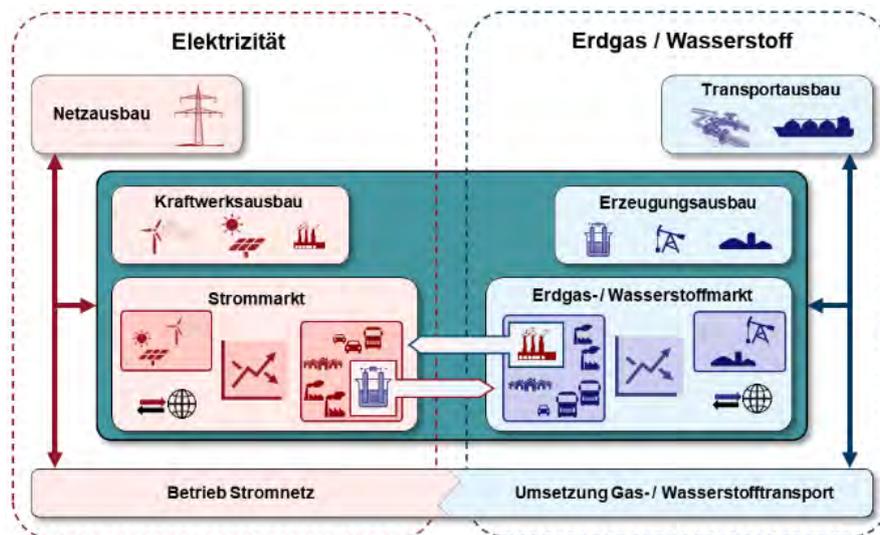


Abbildung 4: Kopplung der Energiemärkte für die Sektoren Strom, Erdgas und Wasserstoff. Eigene Darstellung.

## Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Mirjam Ambrosius, Dr. Robert Burlacu, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Roland Ismer, 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“ wurden angewandte Studien zum deutschen und europäischen Gasmarkt durchgeführt. Hierbei stand das europäische Entry-Exit System im Fokus und es wurde insbesondere untersucht, inwieweit dieses System zu Effizienzverlusten durch ungenutzte Netzkapazitäten führt. Auf Basis dieser Analysen wurden dann mögliche Modifikationen des Systems vorgeschlagen, um zu einer besseren Nutzung der Netzinfrastruktur zu gelangen. In diesem angewandten Kontext wurde 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 [19]) wurde 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 betrachteten aufbauend auf dieser Grundlage realitätsnahe Kalibrierungen für das deutsche System und liefern damit Abschätzungen für die konkreten Ineffizienzen des Entry-Exit Systems.

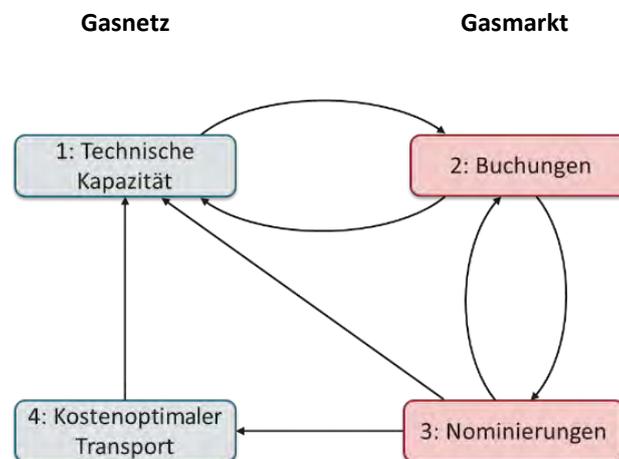


Abbildung 5: Abhängigkeiten in dem mehrstufigen Modell des Europäischen Entry-Exit Systems. Eigene Darstellung.

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 [48]; Plein, et al., 2021 [53]; Schewe, Schmidt und Thürauf, 2020 [58, 59]; Thürauf, 2020 [83]). Grimm et al. (2020) [72] analysierten mehrstufige Spiele mit mehreren Spielern auf beiden Stufen (Abbildung 6) und entwickelten einen Lösungsalgorithmus, der alle Gleichgewichte einer bestimmten Klasse an Spielen findet. Der Algorithmus wurde in einer Case-Study auf Nominierungs- und Buchungsentscheidungen auf Gasmärkten angewandt. Kleinert, Grimm und Schmidt (2021) [40] entwickelten Algorithmen zur Lösung einer bestimmten Klasse an gemischt-ganzzahligen

mehrstufigen Optimierungsproblemen und präsentierten numerische Studien, die die Anwendbarkeit der Probleme illustrieren. Böttger et al. (2022) [12] nutzten ein vierstufiges Modell des Entry-Exit Gasmarktes (Grimm et al., 2019 [26]), um die Effizienzverluste eines Entry-Exit-Systems im Vergleich mit einem Systemoptimum zu ermitteln. Schewe, Schmidt und Thürauf, 2020 [58] entwickelten Lösungsmethoden für ein vierstufiges Modell des Entry-Exit Gasmarktes (Grimm et al., 2019 [26]) 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. (2021) [67] 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) [51] gaben erste Ergebnisse auf dem Weg zum Verständnis von Kapazitätsmaximierung in einem zunächst vereinfachten Setting.

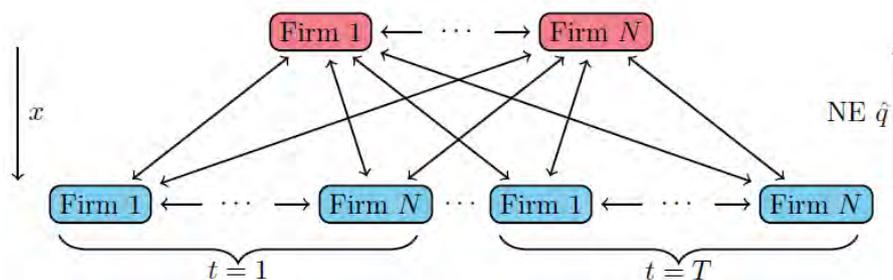


Abbildung 6: Spielstruktur mit mehreren Leadern und Followern. Vgl. Grimm et al. (2020) [72].

Zusätzlich konnte für die Modellierung von Entry-Exit Gasmärkten im Forschungsschwerpunkt vielfach auf die grundlegenden Ergebnisse des SFB TRR 154 zurückgegriffen werden (Burlacu et al., 2019 [13]; Grimm et al., 2019 [19]; Kufner et al., 2019 [47]; Kleinert, Grimm und Schmidt, 2021 [40]).

## Anwendungen

Im Rahmen der Kooperation zwischen TRR 154 und dem EnCN wurden 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 kamen verstärkt Methoden zum Einsatz, die im TRR 154 entwickelt worden. In der zweiten Förderphase des TRR 154 (2018–2022) spielt dabei die mathematische Analyse von Marktthemen eine größere Rolle.

Eine zentrale Herausforderung für die Energiewende ist die Substitution von fossilem 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 [70]). Dabei ist insbesondere eine detaillierte Abbildung der Schnittstellen zwischen verschiedenen Energiemärkten eine zentrale Herausforderung. Für Anwendungen auf das deutsche Energiesystem wurden die Vorarbeiten zu detaillierten regionalen Datensätzen für Strom- und Gasmärkte um Wasserstoff erweitert. Dafür wurden 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.

Außerdem entwickelten Robinius et al., 2019 [55] Verfahren für optimale Ausbauentscheidungen in potentialgetriebenen Transportnetzen, zu denen auch Gastransportnetzwerke zählen. Wasserstoff als Energieträger könnte in Deutschland in Zukunft teils aus überschüssigen erneuerbarem Strom in Norddeutschland produziert und über den Seeweg importiert werden. Daraus würde sich ein größerer Transportbedarf von den Küstenregionen zu den Industriezentren in West- und Süddeutschland einstellen. Reuß et al. (2019) [54] berechneten in diesem Kontext für verschiedene Szenarien und Annahmen die optimale Topologie für mögliche Wasserstoffpipelines (Abbildung 7). Dabei wurde gezeigt, dass die Investitionskosten bei Netzwerken die einen Baum beschreiben deutlich geringer sind als in sternförmigen Netzen. Außerdem erhöhen vereinfachende Annahmen über die Flussphysik in Pipelines die modellierten Gesamtkosten. Bei Berücksichtigung der nichtlinearen Flussphysik konnte damit gezeigt werden, dass durch eine entsprechende Auslegung der Netzinfrastruktur, insbesondere in Baumnetzen, die Investitionskosten zusätzlich gesenkt werden können.

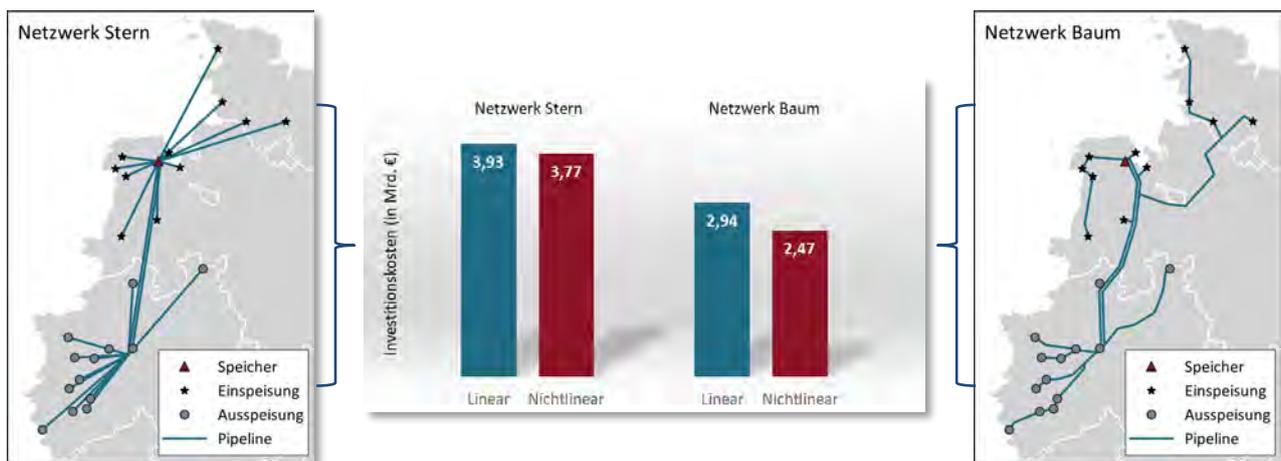


Abbildung 7: Netzwerktopologie für stern- und baumförmige Investitionen in Wasserstoffpipelines. Vgl. Reuß et al. (2019) [54].

## 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“ untersuchten Mathematiker, Ökonomen und Juristen, mithilfe welcher Marktmechanismen und Anreizstrukturen eine sinnvolle Interaktion aller 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 wurde auch das Investitionsverhalten in empirischen Studien untersucht. Außerdem erfolgte eine detaillierte Auseinandersetzung mit den rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die Forschungsarbeiten bauten 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 [21]). In Arbeiten mit stärkerem mathematischem Fokus wurden diese verschiedenen Perspektiven ergänzt, indem Grimm et al. (2021) [23] optimale Tarifstrukturen auf der Endverbraucherebene in Smart Grids mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme bestimmten und Grimm et al. (2020) [18] das Zusammenwirken von Speicher- und Leitungsinvestitionen in Verteilnetzen in Hinblick auf den Regulierungsrahmen in einem zweistufigen Gleichgewichtsmodell untersuchten. Bohlender et al. (2021) [9] (2020) [10] (2018) [11] betrachteten 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, 2020 [21]) (Abbildung 8). Es zeigte 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 wurde von potenziell Teilnehmenden insbesondere auf eine transparente Kommunikation und intensive Betreuung Wert gelegt. Diese sind sogar bedeutsamer als finanzielle Vorteile.

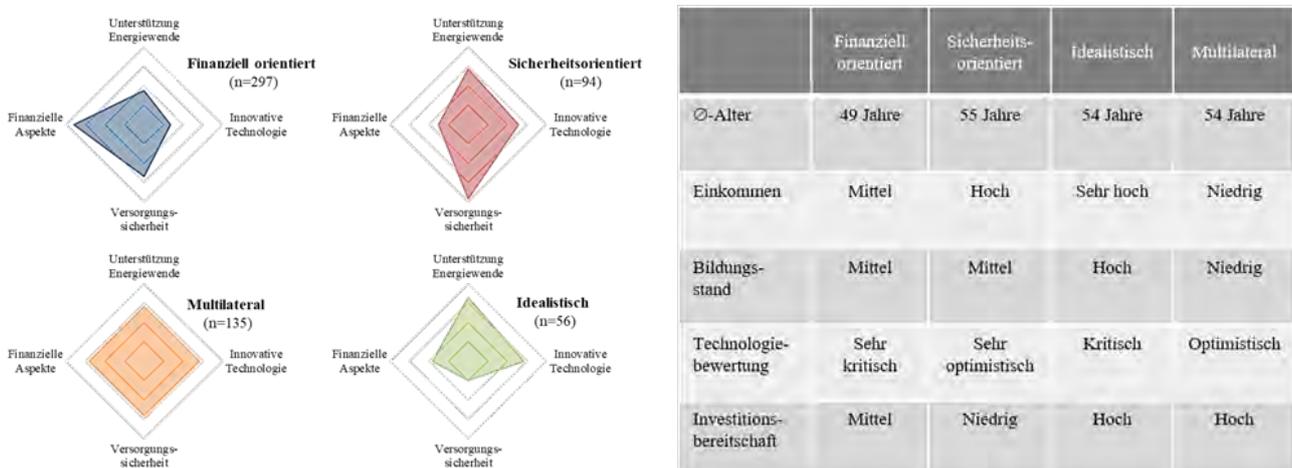


Abbildung 8: Relevanz verschiedener Kaufkriterien und Identifikation unterschiedlicher Investitionstypen. Eigene Darstellung.

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 [18]). 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) [18] untersuchten 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 wurde mit der Leistung nach den heute in verschiedenen Ländern üblichen Regeln sowie mit einem systemoptimalen Benchmark verglichen. Zur Veranschaulichung der wirtschaftlichen Auswirkungen wurde das Modell mit Daten aus dem Feldprojekt „Smart Grid Solar“ kalibriert. Die Ergebnisse in Grimm et al. (2020) [18] zeigen, dass sowohl eine Abregelung erneuerbarer Produktion als auch eine Neugestaltung der Netzentgelte das Potenzial haben, die Gesamtsystemkosten deutlich zu reduzieren. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass eine reine Förderung von Speicherinvestition dagegen nur eine begrenzte Wirkung hat, solange der Verteilnetzbetreiber nicht in den Speicherbetrieb eingreifen darf.

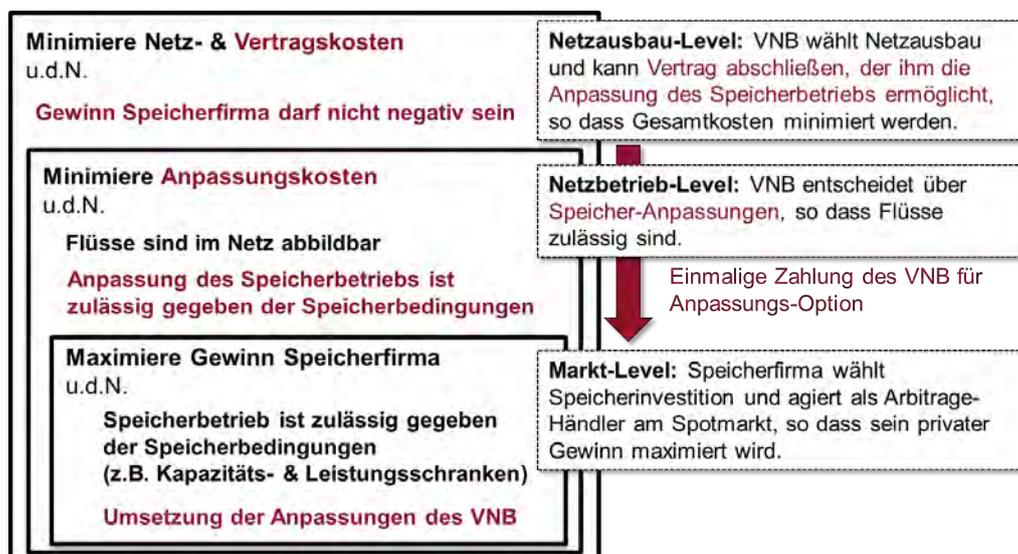


Abbildung 9: Schematische Darstellung des dreistufigen Optimierungsproblems zur Abbildung der Mehrfachnutzung von Speichern. Eigene Darstellung.

Aus der Forschungsarbeit zu Stromversorgungstarifizierung auf der Endverbraucherebene ist die Publikation Grimm et al. (2021) [23] entstanden. Darin wird mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme die Auswirkung verschiedener Möglichkeiten der flexiblen Preisgestaltung für Endkunden mit eigenen Stromproduktionsanlagen und Energiespeichern untersucht. Der sogenannte „Prosumer“ strebt im Modellansatz einen kostenoptimalen Plan für die eigenen Produktionsanlagen und Energiespeicher an, wobei Strombezug aus dem Versorgungsnetz nach jeweiligem Tarifschema des Stromversorgers erfolgt. Der Stromversorger verkauft an der Börse erworbenen Strom an den Prosumer und antizipiert für die Festlegung der flexiblen Tarifkomponenten das Verhalten des Prosumers. Dabei müssen die Tarifbedingungen von flexiblen Tarifen für den Prosumer jeweils mindestens so attraktiv sein, wie bei einem auf dem Markt üblicherweise angebotenen Fixpreistarif. Betrachtet werden außer Fixpreistarif ein flexibler Tarif mit Real-Time-Pricing (d. h. direkter Weitergabe der Börsenpreise an den Prosumer) sowie zwei flexible Tarife, die eine mehrstufige Modellierung erfordern: (i) Time-of-Use-Pricing und (ii) Critical-Peak-Pricing. Die letzten beiden Tarife erlauben dem Stromversorger in bestimmten Zeitfenstern die Bezugspreise für den Prosumer zu erhöhen, was eine partielle Übertragung der Börsenpreisanreize an den Prosumer möglich macht. Alle drei flexiblen Tarife bewirken beim Prosumer

Verhaltensänderungen (Abbildung 10), die höhere Gewinne für den Stromversorger ermöglichen. Werden allerdings nicht wie beim Real-Time-Pricing alle Börsenpreisanreize an den Prosumer durchgereicht, können flexible Strompreise zu mehrdeutigen kostenminimalen Plänen beim Prosumer führen. Die Gewinne des Stromversorgers, die vom Verhalten des Prosumers abhängen, unterliegen also aufgrund dieser Mehrdeutigkeiten Schwankungen. Im schlechtesten Fall könnte es für die Time-of-Use und Critical-Peak-Pricing Tarife dazu führen, dass der Stromversorger keine Gewinne im Vergleich zum Fixpreistarif macht.

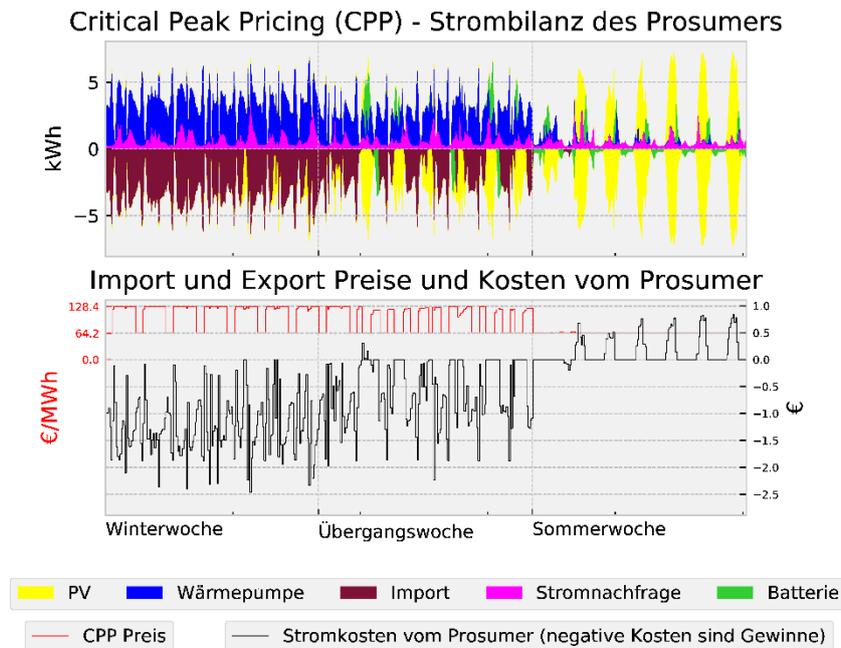


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Preise und Strombilanz für den Prosumer. Eigene Darstellung.

In einem Projekt zu Investitionen in existierende dezentrale Energiesysteme entwickelten Bohlayer et al. (2020) [10] ein mehrstufiges stochastisches Optimierungsproblem, 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, wurde 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.

## 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

In der zweiten Förderphase konnte sich der Forschungsbereich Energiemarktdesign des EnCN sehr erfolgreich weiterentwickeln. Die Ergebnisse der Forschung wurden zumeist 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 waren 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 hat mit einer gemeinsamen hochrangigen Veröffentlichung einen erfolgreichen Verlauf genommen. Durch die Verschränkung mit den Aktivitäten des Zentrum Wasserstoff.Bayern konnte die Forschung zunehmend mit Industriekooperationen verknüpft werden. Insbesondere vor dem Hintergrund der ambitionierteren Klimaziele des European Green Deal und des Koalitionsvertrags der neuen Bundesregierung 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 führte 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 drückte sich der stärkere interdisziplinäre Fokus beispielsweise in dem Verbundprojekt EOM-Plus aus, das gemeinsam mit der TH Ingolstadt (Ingenieurwissenschaften) und der Würzburger Stiftung Umweltenergierecht durchgeführt wird. Darüber hinaus wurden verschiedene Industrieprojekte angestoßen. In den Projekten, die zum Teil gemeinsam mit technischen Hochschulen stattfinden, wurde auch die Möglichkeiten des BayWiss-Verbundkollegs für gemeinsame Promotionen vorgesehen.

Die Vernetzung mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern wurde im Rahmen von Workshops und anderen Austauschformaten über den gesamten Förderzeitraum vorangetrieben. Unter Federführung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) und in Kooperation mit der Messe Nürnberg wurde 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. Diese Aktivitäten haben nicht zuletzt der Vernetzung und der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft einen weiteren Schub verliehen und trugen zum Ziel bei, Nürnberg als Standort einer weltweit sichtbaren Wasserstoffmesse zu etablieren. Darüber hinaus wurde ein Forschungsvorhaben zu Auswirkungen der Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft auf den Arbeitsmarkt in einer Kooperation mit dem Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB) gestartet und 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 verbrachte Dr. van der Weijde einen Gastaufenthalt an der FAU Erlangen-Nürnberg im Rahmen eines Humboldt Fellowships. In Zukunft werden sich die Beziehungen der FAU Erlangen-Nürnberg 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“ konnte im zweiten Förderzeitraum ein regelmäßiger Austausch in einem starken (inter-)nationalen Netzwerk etabliert werden.

Der Forschungsbereich EMD hat in den vergangenen Jahren sehr erfolgreiche Nachwuchsarbeit geleistet. Nachwuchsforschende werden systematisch in die oben aufgeführten nationalen und internationalen Kooperationen sowie in die Politikberatung eingebunden und übernehmen auch Aufgaben im Rahmen der „Third Mission“. In der Lehre wurden Seminare und Abschlussarbeiten gemeinsam mit Kooperationspartnern aus der Wirtschaft durchgeführt. 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.

In Zukunft wird ein Teil der Aktivitäten im Rahmen von Forschungsprojekten fortgeführt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung der Methoden im Hinblick auf dezentrale Strommärkte (Projekt EOM-Plus), der dritten Phase des TRR 154 zur Modellierung von Gasnetzen, sowie auf Fragen des Marktdesigns bei der Sektorkopplung von Strom-, und Gas- und Wasserstoffmärkten. Außerdem wird in einem Projekt die Wasserstofflogistik von der Produktion von blauen und grünen Wasserstoffs, über den internationalen Wasserstofftransport, bis zur Integration von Wasserstoff in Nachfragemärkte untersucht. 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.

## 5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

**Prof. Dr. Veronika Grimm** war 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 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 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)
- Studiendekanin, Department Mathematik, FAU (von 2016 bis 2019)
- Mitglied Editorial Board Mathematical Methods of Operations Research (seit 2015)

**Prof. Dr. Alexander Martin** war in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied des Bayerischen KI-Rats (seit 2020)
- Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) (seit 2019)
- Mitglied im Senats- und Bewilligungsausschuss für Graduiertenkollegs der DFG (seit 2019)
- Mitglied des Vorstands 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 (von 2016 bis 2020)
- 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](http://www.optimization-online.org) (seit 2010)

- Associate Editor, Discrete Optimization (von 2009 bis 2018)
- Associate Editor, Mathematical Programming C (von 2008 bis 2021)
- Ehrenamtliches Mitglied des BMBF Beirates Mathematik (seit 2007)

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

- **Dr. Mirjam Ambrosius.** Fakultätsfrauenpreis der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät für das Forschungsprojekt Mathematische Modellierung des deutschen Strommarkts. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017
- **Dr. Mirjam Ambrosius.** Einladung zum 6th Lindau Meeting on Economic Sciences (Lindau Nobel Laureate Meeting). Lindau, 22.08.2017 – 25.08.2017
- **Sandra Kretschmer.** Theodor-Wessels-Preis. Beste Abschlussarbeit im Bereich der Energiewirtschaft. The Environmental Effect of Green Electricity Consumption: An Econometric Analysis. Köln, 08.11.2017
- **Vanessa Krebs.** Energiepreis des EnCN e.V. für ihre Masterarbeit. Grundlagenbetrachtungen zur Modellierung von Energiemärkten. Nürnberg, 13.12.2017
- **Dr. Mirjam Ambrosius.** Best Scientific Presentation Award auf der 12<sup>th</sup> Conference on Energy Economics and Technology in Dresden für das gemeinsame Projekt „Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning“ mit Veronika Grimm, Thomas Kleinert, Frauke Liers, Martin Schmidt und Gregor Zöttl. Technische Universität Dresden, 27.04.2018.
- **Dr. Jonas Egerer.** Förderung der Emerging Talent Initiative für das Projekt „Optimal regional decisions for the sustainable transformation of electricity markets“. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Juli, 2018.
- **Philipp Runge.** Energiepreis des EnCN e.V. für seine Masterarbeit. „Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035“. Energie Campus Nürnberg, 13.12.2018.
- **Lukas Lang.** Prof. Wolfgang-Polasek-Nachwuchspreis der Österreichische Gesellschaft für Operations Research. 13.06.2019.
- **Sandra Kretschmer.** Fakultätsfrauenpreis der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der FAU Erlangen-Nürnberg für ihr Promotionsvorhaben zu Möglichkeiten einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Umsetzung der Energiewende. 09.07.2019.
- **Dr. Christian Sölch.** Promotionspreis der Hermann Gutmann Stiftung für seine Promotion „The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investments in Liberalized Electricity Markets with Zonal Pricing“. 23.07.2019.
- **Dr. Mirjam Ambrosius, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm und Dr. Harry van der Weijde.** GEE Best Paper Award auf der International Ruhr Energy Conference (INREC) in Essen für den Forschungsartikel „Uncertain bidding zone configurations: the role of expectations for transmission and generation capacity expansion“. 25.09.2019.
- **Johannes Thürauf.** Energiepreis des EnCN e.V. für seine Masterarbeit „Discrete Selection of Diameters for Constructing optimal Hydrogen Pipeline Networks“. 05.12.2019.
- **Julia Grübel.** Hermann-Gutmann-Preis für besondere wissenschaftliche Leistungen für den Forschungsartikel „Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches“. 10.12.2019.
- **Johannes Wirth.** Energiepreis des EnCN e.V. für seine Bachelorarbeit „Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Bepreisung in Europa in Ergänzung zum EU-ETS“. 14.12.2020.
- **Dr. Jonas Egerer.** Schöller Fellow 2021 mit dem Forschungsprojekt „Marktdesign von Strom- und Wasserstoffmärkten in mehrstufigen Energiemarktmodellen“. 01.01.2021.
- **Dr. Jonas Egerer.** Hermann-Gutmann-Preis für besondere wissenschaftliche Leistungen für den Forschungsartikel „Uncertain bidding zone configurations: The role of expectations for transmission and generation capacity expansion“. 20.10.2021.

- **Dr. Manuel Haußner**, Dissertationspreis Umweltenergierecht für seine Dissertation „Including Consumption into Emissions Trading – Economic Rationality, EU Law Conformity, WTO Law Compatibility and Practical Administration“. 20.10.2021.
- **Dr. Mirjam Ambrosius, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm und Dr. Harry van der Weijde**. ENRE Best Publication Award in Energy (INFORMS) für den Forschungsartikel „Uncertain bidding zone configurations: The role of expectations for transmission and generation capacity expansion“. 24.10.2021.
- **Kiana Niazmand**. Energiepreis des EnCN e.V. für ihre Masterarbeit „Techno-economic Analysis on Importing Green Ammonia to Germany - Case Study for Australia“. 02.12.2021.

Im Bereich Energiemarktdesign waren folgende Personen zu Gast:

- Dr. Daniel Huppmann (IASSA Wien). 10./11.01.2018
- Prof. Dr. Martin Bichler (TU München). 18.01.2018
- Prof. Dr. Martine Labbé (Université Libre de Bruxelles). 04.02.2018 - 06.02.2018
- Dr. Harry v. d. Weijde (University of Edinburgh). Schöller Fellow im Jahr 2018/2019
- Prof. Dr. Steven Gabriel (University of Maryland). 21.-23.10.2018
- Dr. Alice Pirlot (University of Oxford). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 25.10.2018
- Dr. Mathur Aparna (American Enterprise Institute). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 25.10.2018
- Ass. Prof. Dr. Marilyn Sadowsky (University Panthéon-Sorbonne). FAU-SIT: Seminar on International Taxation 15.11.2018
- Prof. Dr. Werner Haslehner (University of Luxembourg). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 22.11.2018
- Ass. Prof. Dr. John Vella (University of Oxford). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 04.12.2018
- Prof. Dr. Lukasz Stankiewicz (University of Lyon). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 03.05.2018
- Ass. Prof. Dr. Katerina Pantazatou (University of Luxembourg) FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 26.04.2018
- Prof. Angus Johnston (University of Oxford). Principles of European Law, 15./16.12.2018
- Prof. Dr. Tomaso Duso (DIW Berlin). NRSE, 12.12.2018
- Prof. Stefan Reichelstein, Ph.D., Universität Mannheim. Mit Vortrag: „Synergistic Value in Vertically Integrated Power-to-Gas Systems“, 17.10.2019.
- Prof. Dr. Günter Glenk, Universität Mannheim. Mit Vortrag: „The Economics of Reversible Power-to-Gas Systems“, 17.10.2019.
- Prof. Dr. Miguel Anjos, University of Edinburg and Polytechnique Montréal. Mit Vortrag: „Tight-and-Cheap Conic Relaxations for Optimal Power Flow and Optimal Reactive Power Dispatch“, 06.12.2019.
- Alice Pirlot, Ph.D., Oxford University. Mit Vortrag: „A legal Analysis of the Role and Effects of International Taxation on Environmental Protection“, 17.12.-19.12.2019.
- Prof. Dr. Marta Villar Ezcurra, Universidad CEU San Pablo Madrid. FAU-SET: Seminar on Environmental Taxation, 08.01.2020

## 6 Vorträge

- [1] L. Schewe. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. Workshop on Combinatorial Optimization, Aussois, 09.01.2017
- [2] M. Schmidt. Optimal Price Zones of Electricity Markets: A Mixed-Integer Multilevel Model and Global Solution Approaches. 21st Combinatorial Optimization Workshop, Aussois, 09.01.2017
- [3] M. Haußner. Structure of Public Innovation Support. Workshop on Policy Design for a Climate-Friendly Materials Sector, DIW Berlin, Berlin, 23.01.2017
- [4] R. Ismer. Structure of Public Innovation Support. Workshop on Policy Design for a Climate-Friendly Materials Sector, DIW Berlin, Berlin, 23.01.2017

- [5] V. Grimm. Expertengespräch: Investitionen im Strommarkt: Was kostet die Energiewende? mit Grimm V und P. Graichen. 25. Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft 2018, Berlin, 25.01.2017
- [6] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. IWF Doktorandenseminar, Nürnberg, 31.01.2017
- [7] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. V International Academic Symposium - Challenges for the Energy Sector, Barcelona, 07.02.2017
- [8] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets. DICE Research Seminar, HHU Düsseldorf, Düsseldorf, 07.02.2017
- [9] M. Schmidt. Optimal Price Zones of Electricity Markets: A Mixed-Integer Multilevel Model and Global Solution Approaches. Workshop Energiemärkte, Nürnberg, 16.02.2017
- [10] J. Grübel. Evaluating capacities and welfare optimal nominations in gas networks. Workshop „Energiemarktmodellierung“, am EnCN Nürnberg, Nürnberg, 17.02.2017
- [11] L. Schewe. Evaluating capacities and welfare optimal nominations in gas networks. Workshop „Energiemarktmodellierung“, am EnCN Nürnberg, Nürnberg, 17.02.2017
- [12] C. Sölch. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Klausurtagung des Bund Naturschutz Hof, Wunsiedel, 17.02.2017
- [13] A. Martin. Network Flow Problems with Physical Constraints. International Conference on Network Optimization, Lissabon, Portugal, 26.02.2017
- [14] A. Martin. Mixed Integer Programming for Energy Networks. Shell Lecture, CAAM Colloquium, Rice University, Houston TX, USA, 06.03.2017
- [15] C. Sölch. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Bürgerdialog Stromnetz Expertenveranstaltung "Dezentrale Stromerzeugung und/oder Netzausbau?", Regensburg, 13.03.2017
- [16] V. Grimm. Präsentation des EnCN-Projekts „Energiemarktdesign“. Fachbeiratssitzung des EnCN, Nürnberg, 17.03.2017
- [17] M. Schmidt. Mathematical Optimization for Energy Networks. Advances in Renewable Energy Technologies (Texas A&M University at Qatar), Doha, 03.04.2017
- [18] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets. Texas A&M University at Qatar, Doha, 04.04.2017
- [19] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. 22nd Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES), Nürnberg, 27.04.2017
- [20] L. Schewe. Complexity of MINLPs from Gas Network Optimization. SIAM Conference on Optimization 2017, Vancouver, 23.05.2017
- [21] M. Schmidt. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Nonlinear Optimization. SIAM Conference on Optimization 2017, Vancouver, 24.05.2017
- [22] V. Grimm. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Monopolkommission, Bonn, 19.06.2017
- [23] V. Grimm. System-optimal expansion of renewables in Germany: A model-based analysis of regionally differentiated tariffs. Seminar on Energy and Environmental Economics Munich (SEEM) at TUM, München, 22.06.2017
- [24] M. Haußner. Including Consumption of carbon-intensive Materials into Emissions Trading Schemes: An EU ETS Perspective. 23rd EAERE Conference, Athen, 01.07.2017
- [25] V. Grimm. Dezentralität und Zellulare Optimierung. 8. Forum Energiewende, Siemens, Erlangen, 05.07.2017
- [26] V. Grimm. Energiemarktdesign am EnCN. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.07.2017
- [27] L. Schewe. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. EUROPT 2017, Montreal, 13.07.2017
- [28] J. Grübel. Welfare optimal nominations in passive gas networks and associated equilibria. 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS 2017), Quebec Stadt, 17.07.2017
- [29] J. Egerer. Modeling inefficiencies in booking-based gas markets. 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS 2017), Quebec Stadt, 18.07.2017

- [30] L. Schewe. Solving Mixed-Integer Nonlinear Programs with hierarchical Mixed-Integer Linear Programming relaxations. IFORS 2017, Quebec Stadt, 18.07.2017
- [31] M. Schmidt. MIP-based instantaneous control of mixed-integer PDE-constrained gas transport problems. IFORS 2017, Quebec Stadt, 18.07.2017
- [32] C. Sölch. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Stadt & Kreis Coburg Expertenveranstaltung "Sind weniger Netze mehr?", Coburg, 26.07.2017
- [33] B. Rückel. Regionally differentiated Network Fees to provide proper Incentives for Generation Investments. 23. Workshop des GEE Student Chapter, München, 28.07.2017
- [34] M. Ambrosius. Optimal Price Zones for the German Electricity Market. 15th IAEE European Conference, Wien, 05.09.2017
- [35] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. 15th IAEE European Conference, Wien, 05.09.2017
- [36] J. Egerer. National-strategic transmission investment and zonal pricing. 15th IAEE European Conference, Wien, 06.09.2017
- [37] T. Kleinert. Evaluating alternative market designs in electricity markets: a mixed-integer multilevel optimization model and global solution techniques. International Conference on Operations Research, Berlin, 06.09.2017
- [38] A. Martin. Network Flow Problems with Physical Transport. International Symposium on Operations Research 2017, Berlin, 07.09.2017
- [39] R. Ismer. Konsumabgabe auf CO<sub>2</sub>-intensive Grundstoffe. Berlin Seminar on Energy and Climate Policy, DIW Berlin, Berlin, 17.10.2017
- [40] V. Grimm. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Lange Nacht der Wissenschaft in Nürnberg, Nürnberg, 21.10.2017
- [41] M. Schmidt. Mathematik für die Energiewende. Lange der Nacht der Wissenschaften, Nürnberg, 21.10.2017
- [42] J. Grübel. Natural gas in Germany: Perspectives on market design and network infrastructure. Bayerisch-Russische Fachkonferenz „Wirtschaftswissenschaften“, Nürnberg, 10.11.2017
- [43] L. Schewe. Wie Mathematik helfen kann, Gas-, Wasser- und Stromnetze besser zu planen. Unitag, Erlangen, 17.11.2017
- [44] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [45] J. Egerer. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [46] V. Grimm. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Keynote auf der EnCN-Jahrestagung, Nürnberg, 13.12.2017
- [47] T. Kleinert. Mathematical Challenges in Energy Market Design. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [48] S. Kretschmer. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [49] B. Rückel. Regionally differentiated Network Fees to provide proper Incentives for Generation Investments. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [50] P. Runge. Economic comparison of different electrofuels for energy scenarios in 2035. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [51] J. Thürauf. Discrete Selection of Diameters within Tree-Shaped Pipeline Networks. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [52] R. Ismer. Aktuelles aus der Rechtsprechung (Podiumsdiskussion). Aktuelle Entwicklungen im Energie- und Stromsteuerrecht. 8. Deutscher Energiesteuertag, BDI, Berlin, 15.12.2017.
- [53] M. Schmidt. Mixed-Integer Optimization for Energy Systems. 661. WE-Heraeus-Seminar "Nonlinear Dynamics, Optimization and Control of Distributed Energy Systems", Bad Honnef, 29.01.2018
- [54] F. Liers. Robust Treatment of Non-Convex Optimization Problems and an Application to Gas Networks. Designing and Implementing Algorithms for Mixed Integer Nonlinear Optimization, Schloss Dagstuhl, 19.02.2018
- [55] J. Grübel. Natural gas in Germany: Perspectives on market design and network infrastructure. Bavarian Berlin Energy Research Workshop (BB2), Berlin, 22.02.2018

- [56] C. Sölch. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Bavarian Berlin Energy Research (BB<sup>2</sup>), Berlin, 22.02.2018
- [57] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Berlin, 23.02.2018
- [58] S. Kretschmer. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Berlin, 23.02.2018
- [59] V. Grimm. Zum optimalen Zubau von Netzkapazität und Erneuerbaren Energien im liberalisierten Strommarkt. 82. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Erlangen, 06.03.2018
- [60] M. Haußner. Long-term and short-term policy options for carbon pricing. Policy packages for low-carbon road maps in the materials sector, Berlin, 16.03.2018
- [61] M. Schmidt. Mathematische Optimierung im Energiebereich. Eingeladener Vortrag bei der sonnen GmbH, Wildpoldsried, 20.03.2018
- [62] S. Kretschmer. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Evidence-Based Economics Machine Learning Workshop, München, 22.03.2018
- [63] F. Liers. Robust Treatment of Non-Convex Optimization Problems. 7th International Conference on High-Performance Scientific Computing, Hanoi, 22.03.2018
- [64] M. Schmidt. Network Expansion, Price Zones, and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization to the German Electricity Market. Eingeladener Vortrag bei Siemens zum Thema "Mathematical Algorithms for Comprehensive Energy Management Systems", Erlangen, 05.04.2018
- [65] J. Egerer. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. ENERDAY Conference, Dresden, 26.04.2018
- [66] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Enerday 2018, Dresden, 27.04.2018
- [67] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. ENERDAY 2018, Dresden, 27.04.2018
- [68] M. Schmidt. Mathematik - Wozu? Über Graphentheorie und Google. Schülervortrag am Dürer-Gymnasium Nürnberg, Nürnberg, 02.05.2018
- [69] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. ENERGY 2018, Mannheim, 15.05.2018
- [70] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ÖGOR Workshop Wien, Wien, 17.05.2018
- [71] M. Schmidt. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. 13. ÖGOR-IHS Workshop & ÖGOR Arbeitskreis Mathematische Ökonomie und Optimierung in der Energiewirtschaft 2018, Wien, 17.05.2018
- [72] R. Ismer. Inclusion of Consumption into the EU Emissions Trading Scheme rather than Border (Tax) Adjustments: Economic and Legal Aspects. CBT Research Seminar, Oxford, 11.06.2018
- [73] J. Egerer. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. 41st IAEE International Conference, Groningen, 12.06.2018
- [74] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 12.06.2018
- [75] J. Grübel. Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. IWF-Doktorandenseminar, Nürnberg, 12.06.2018
- [76] B. Rückel. Regionally differentiated network fees to provide proper incentives for generation investment. 41st IAEE International Conference, Groningen, 12.06.2018
- [77] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. 41st IAEE International Conference, Groningen, 13.06.2018
- [78] C. Sölch. Possible Regulatory Frameworks for Enabling Multiple Use of Storage Devices by Regulated and Private Market Participants in Smart Grids. 41st IAEE International Conference, Groningen, 13.06.2018
- [79] T. Kleinert. A Global Solution Approach for MIQP-QP Bilevel Problems. IWOBIP 2, Lille, 20.06.2018

- [80] M. Schmidt. Combining Network Design and Graph Partitioning in a Multilevel Framework for Electricity Markets. IWOBIP'18. 2nd International Workshop on Bilevel Programming, Lille, 22.06.2018
- [81] J. Thürauf. Robust Optimal Discrete Arc Sizing for Tree-Shaped Potential Networks. ISMP 2018, Bordeaux, 02.07.2018
- [82] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ISMP 2018, Bordeaux, 03.07.2018
- [83] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 03.07.2018
- [84] T. Kleinert. Combining Network Design and Graph Partitioning in a Multilevel Framework for Electricity Markets. ISMP 2018, Bordeaux, 04.07.2018
- [85] M. Schmidt. The Impact of Physics on Market Equilibria in Energy Networks. ISMP 2018. 23rd International Symposium on Mathematical Programming, Bordeaux, 04.07.2018
- [86] J. Grübel. Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. ISMP 2018, Bordeaux, 05.07.2018
- [87] G. Orlinskaya. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. ISMP 2018, Bordeaux, 05.07.2018
- [88] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. EURO 2018, Valencia, 11.07.2018
- [89] J. Grübel. Computational analysis of market designs for smart grid implementation. EURO 2018, Valencia, 11.07.2018
- [90] M. Ambrosius. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. iSEnEC Conference, Nürnberg, 17.07.2018
- [91] V. Grimm. Regional Differentiation of Renewable Energy Subsidies: A Long Term Assessment. iSEnEC Conference, Nürnberg, 17.07.2018
- [92] T. Kleinert. Mathematical Optimization for Energy Market Design - Challenges and Solution Approaches. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [93] V. Krebs. Uniqueness and multiplicity of market equilibria on DC power flow networks. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [94] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [95] J. Grübel. Modeling inefficiencies in booking-based gas markets. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [96] G. Orlinskaya. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [97] B. Rückel. Simultaneous storage and transmission expansion planning in smart grids. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [98] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [99] C. Sölch. Possible Regulatory Frameworks for Enabling Multiple Use of Storage Devices by Regulated and Private Market Participants in Smart Grids. iSEnEC Conference, Nürnberg, 18.07.2018
- [100] J. Thürauf. Robust Optimization with Application in Utility Network Design. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [101] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. Evidence-Based Economics Research Strategy Seminar, München, 23.07.2018
- [102] V. Grimm. Energiemarktdesign am EnCN. Besuch von Katja Hessel am EnCN, Nürnberg, 02.10.2018
- [103] M. Schmidt. A Multilevel Model of the European Entry-Exit Gas Market. 2nd Conference on Mathematics of Gas Transport, Berlin, 10.10.2018
- [104] J. Thürauf. Robust Optimal Discrete Arc Sizing for Tree-Shaped Potential Network. MOG2, Berlin, 10.10.2018
- [105] J. Egerer. Research for the next stage of the low-carbon energy transformation. Berlin Conference on Sustainable Energy and Infrastructure Economics and Policy (BELEC), Berlin, 12.10.2018
- [106] V. Grimm. Panel: Regulating Infrastructure Markets. MaCCI Konferenz, Mannheim, 16.11.2018
- [107] R. Ismer. Neues aus der Rechtsprechung - Diskussion. 9. Deutscher Energiesteuertag, Berlin, 23.11.2018

- [108] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Aktionstage Nachhaltigkeit 2018, Nürnberg, 26.11.2018
- [109] R. Ismer. Die Europäische Union und der deutsche Strompreis. Faszination Energie: EnCN, Nürnberg, 28.11.2018
- [110] V. Grimm. Podiumsdiskussion – Wie können Innovationen im Energiebereich gefördert werden? dena SET Lab Dialogveranstaltung am BMWI, Berlin, 10.12.2018
- [111] V. Grimm. Wie viel Dezentralität braucht die Energiewende? EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [112] S. Kretschmer. Influence of organisational setups on the perception of pilot projects. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [113] P. Runge. Synthetische Kraftstoffe aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energien als Beitrag zur deutschen Energiewende. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [114] C. Sölch. Regional differenzierte Investitionsanreize für Erneuerbare Energien. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [115] M. Ambrosius. The Role of Expectations for Market Design - on Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 29.01.2019
- [116] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. VII International Academic Symposium (IEB), Barcelona, 05.02.2019
- [117] V. Grimm. Impulsvortrag zur Industriestrategie anlässlich des Besuchs von BM Altmaier beim Wissenschaftlichen Beirat des BMWi, Berlin, 07.02.2019
- [118] L. Lang. Modelling congestion management in the context of flow-based market coupling. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT), Wien, 13.02.2019
- [119] M. Ambrosius. The Role of Expectations for Market Design - on Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 21.02.2019
- [120] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 21.02.2019
- [121] J. Thürauf. Robust Optimal Hydrogen Tree-Shaped Network Design. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 21.02.2019
- [122] S. Kretschmer. The organizational setup of pilot projects – Influence on consumer perceptions. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 22.02.2019
- [123] G. Orlinskaya. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 22.02.2019
- [124] V. Grimm. Forschungsvortrag zu Auszügen aus dem Projekt Energiemarktdesign, Tagung des Fachbeirats des EnCN, Nürnberg, 29.03.2019
- [125] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. ENERDAY, Dresden, 12.04.2019
- [126] V. Grimm. Generation and Network Investment in Electricity Markets: Using Multilevel Optimization to Assess the Role of the Market Design, Vortrag auf dem Abschlussworkshop des Programms „The Mathematics of Energy Systems“ am Newton Institute der Universität Cambridge, 01.05.2019
- [127] F. Liers. Robust Discrete Optimization: Globalized Gamma-Robustness and Radius of Robust Feasibility. Seminarvortrag, Imperial College, 02.05.2019
- [128] J. Egerer. Die Energiewende in Deutschland. XXII. dialog-Symposium zum Thema „Zukunftsperspektiven erneuerbarer Energien in Deutschland und Russland“, Tübingen, 18.05.2019
- [129] J. Egerer. Gefahr des strategischen Bietens / Liquidität des Smart Market. Workshop im Projekt „SmartBio – Biogasanlagen als Akteur am Smart Market“, Rosenheim, 20.05.2019
- [130] V. Grimm. NUEdialog 2019: Panel „Die Mobilitätswende: Antriebe der Zukunft“, Impulsvortrag und Panelistin, Nürnberg, 23.05.2019
- [131] F. Liers. Robust Optimization: (Some) Theory, (Some) Algorithms, and (Some) Applications. Überblicksvortrag bei Workshop "Mixed-Integer Nonlinear Optimization: A Hatchery for Modern Mathematics", Oberwolfach, 05.06.2019
- [132] L. Lang. A two-level modelling approach for the determination of congestion management. 14. Workshop Mathematische Ökonomie und Optimierung in der Energiewirtschaft (ÖGOR), Wien, 13.06.2019

- [133] M. Ambrosius. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 25.06.2019
- [134] J. Egerer. Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 25.06.2019
- [135] J. Thürauf. Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems (Poster Session). Mathematical Optimization of Systems Impacted by Rare, High-Impact Random Events, ICERM, Providence, 25.06.2019
- [136] T. Kleinert. Computing Feasible Points of Bilevel Problems With a Penalty Alternating Direction Method. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 26.06.2019
- [137] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: The organizational setup of pilot projects and its influence on consumer perceptions. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 26.06.2019
- [138] C. Sölch. Possible Regulatory Frameworks for Enabling Multiple Use of Storage Devices by Regulated and Private Market Participants in Smart Grids. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 26.06.2019
- [139] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. World Hydrogen Technologies Convention, Tokio, 05.07.2019
- [140] A. Martin. Datenanalyse, KI und Optimierung für eine (Energie) Effiziente Versorgung. Workshop "Energie.Digital: Künstliche Intelligenz als Treiber der Energiewende", Nürnberg, 11.07.2019
- [141] M. Ambrosius. Endogenous Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multilevel Optimization with Graph Partitioning. IWF Doktorandenseminar, Nürnberg, 16.07.2019
- [142] V. Grimm. Social Market Economy and Energy Policy, International Summer School "Social Market Economy", Nürnberg, 26.07.2019
- [143] A. Martin. Simulation based mixed integer programming. Second Conference on Discrete Optimization and Machine Learning 2019, RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, Tokio, 30.07.2019
- [144] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. 4Nemo Summer School, München, 30.07.2019
- [145] F. Liers. Robust Optimization for Energy Applications. Semi-Plenary at the 6th International Conference on Continuous Optimization (ICCOPT), Berlin, 07.08.2019
- [146] T. Kleinert. Computing Feasible Points of Bilevel Problems With a Penalty Alternating Direction Method. 6th International Conference on Continuous Optimization (ICCOPT), Berlin, 08.08.2019
- [147] V. Grimm. Die Rolle von Wasserstoff für die Energiewende, Versammlung der Freien Wähler, EnCN, Nürnberg, 07.09.2010
- [148] R. Ismer. Nationale CO<sub>2</sub>-Bepreisung und Reform der EU-Energiesteuerrichtlinie: Gefangen zwischen Emissionshandel und Einstimmigkeit?, Vorträge zu den 22. Würzburger Gesprächen „Rückenwind aus Europa für die Energiewende? Hausaufgaben und Visionen“, Würzburg, 18.09.2019
- [149] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: The organizational setup of pilot projects and its influence on consumer perceptions. Verein für Sozialpolitik Jahrestagung, Leipzig, 23.09.2019
- [150] M. Ambrosius. The Role of Expectations for Market Design - on Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. 8th International Ruhr Energy Conference, Essen, 25.09.2019
- [151] T. Kleinert. Bilevel Optimization - Recent Results. Invited Talk at NEC Laboratories Europe GmbH, Heidelberg, 02.10.2019
- [152] V. Grimm. Vorstellung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H<sub>2</sub>.B), Kommunale 2019 (Bundesweite Fachmesse und Kongress), Messe Nürnberg, 16.10.2019
- [153] V. Grimm. Wie sieht die Mobilität der Zukunft aus? Alternative Antriebe. NUElecture im Germanischen Nationalmuseum in Verbindung mit der Tagung „The Potential of Hydrogen in a Decarbonised Energy Economy“, Nürnberg, 17.10.2019
- [154] V. Grimm. Wie sieht die Mobilität der Zukunft aus? Alternative Antriebe. Lange Nacht der Wissenschaften, EnCN, Nürnberg 19.10.2019
- [155] V. Grimm. Wie sieht die Mobilität der Zukunft aus? Alternative Antriebe. Lange Nacht der Wissenschaften, Friedrich-Alexander-Universität (Findelgasse), Nürnberg, 19.10.2019

- [156] C. Biefel. Wie Mathematik helfen kann, Gas-, Strom- und Wasserstoffnetze für unsichere zukünftige Bedarfe zu planen. Lange Nacht der Wissenschaft in Nürnberg, Nürnberg, 19.10.2019
- [157] V. Grimm. Panelistin auf den Nürnberger Gesprächen zum Thema "Unser Klima retten und unsere Jobs: Geht das überhaupt?", Nürnberg, 21.10.2019
- [158] M. Ambrosius. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 19.11.2019
- [159] V. Grimm. Marktregeln und Sektorkopplung: Die Mobilität der Zukunft, Jahrestagung des EnCN, Nürnberg 05.12.2019
- [160] J. Egerer. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [161] J. Grübel. On Electricity Market Equilibria with Storage: Modeling, Uniqueness, and a Distributed ADMM. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [162] T. Kleinert. Zweistufige Optimierungsprobleme - Eine Einführung. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [163] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [164] J. Thürauf. Uncertainties in Energy Networks: How Optimization Can Help. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [165] V. Grimm. Vorstellung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H<sub>2</sub>.B) auf der Vollversammlung der IHK Nürnberg für Mittelfranken, Nürnberg, 10.12.2019
- [166] J. Thürauf. Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems. Optimization Seminar Edinburgh, Edinburgh, 11.12.2019
- [167] J. Thürauf. Robust Optimal Hydrogen Tree-shaped Network Design. Energy Seminar Edinburgh, Edinburgh, 12.12.2019
- [168] V. Grimm. The future of energy systems and implications for energy policy. Congress-Bundestagsforum der Allbright Stiftung in Elmau, 18.02.2020
- [169] V. Grimm. Der Weg aus dem Corona-Shutdown. Eine risikoadaptierte Strategie. IMFS Seminar, 16.04.2020
- [170] V. Grimm. The Way out of the Corona Shutdown: A risk adapted Strategy. New Economic Forum, 22.04.2020
- [171] J. Thürauf. A Mathematical Challenge: Bookings and Technical Capacities in the European Entry-Exit Gas Market. Energy Seminar Edinburgh, 07.05.2020
- [172] V. Grimm. Hydrogen Production and Import under different Regulatory Frameworks. European Sciences Advisory Council Workshop on Hydrogen, 28.05.2020
- [173] F. Liers. Robust Treatment of Energy Problems. Energy Seminar Edinburgh, 03.06.2020
- [174] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. dena Kolloquium, 05.06.2020
- [175] V. Grimm. Wirtschaftlichen Auswirkungen von Corona - wie kommen wir innovativ und nachhaltig aus dieser Krise? Wirtschaftsbeirat der Grünen Bundestagsfraktion, 08.06.2020
- [176] V. Grimm. Coronexit: nachhaltige Wege aus der Krise. SPD-Bundestagsfraktion, 10.06.2020
- [177] S. Kretschmer. Market Design for Renewable Energy Auctions: An Analysis of Alternative Auction Formats. 25th EAERE Annual Conference , 25.06.2020
- [178] J. Egerer. The impact of neighboring markets on renewable locations, transmission expansion, and generation investment. 25th EAERE Annual Conference, 26.06.2020
- [179] J. Egerer. Modellierung regionaler Investitionen in Erzeugung und Übertragungsnetze. Bürgerdialog Stromnetze, Regionalnetzwerktreffen Franken online, 30.06.2020
- [180] C. Sölch. Economic comparison of electric fuels. ESM meets FAU - Hydrogen Economy (Workshop mit Siemens), 30.06.2020
- [181] V. Grimm. Hydrogen – Perspectives in Germany. EAERE Conference, 02.07.2020
- [182] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für unsere Arbeitsplätze. IAD-H<sub>2</sub>.B Workshop, 06.07.2020
- [183] S. Kretschmer. Green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. Vortrag bei der sonnen AG, 07.07.2020
- [184] J. Egerer. Kurz- und mittelfristige Anreize durch regionale Flexibilitätsmärkte im deutschen Stromsektor. Seminar Energiemärkte mit der N-Ergie, 11.07.2020

- [185] J. Grübel. On Electricity Market Equilibria with Storage: Modeling, Uniqueness, and a Distributed ADMM. ALOP-Colloquium, Universität Trier, 13.07.2020
- [186] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. Lions Club Meistersinger Nürnberg, 23.07.2020
- [187] V. Grimm. Zonale Preisgestaltung und alternative Maßnahmen zur Verringerung von strukturellen Engpässen im Stromnetz. Umweltministeriums Baden-Württemberg, 27.07.2020
- [188] V. Grimm. Update zur Konjunktur und zu wirtschaftspolitischen Fragen. Klausurtagung der Bundestagsfraktion der Grünen. Berlin, 02.09.2020
- [189] V. Grimm. Vortrag Klimaschutz als Industriepolitische Chance. Pressegespräch zur EEG-Umlage mit Vertreter:innen der dann und der SPD Bundestagsfraktion, 07.09.2020
- [190] V. Grimm. Globale Lieferketten und die Corona-Pandemie. Handelsblatt Tagung Asia Business Insights, Düsseldorf, 08.09.2020
- [191] V. Grimm. Konjunkturupdate. Herbstklausur der Freien Wähler, München, 09.09.2020
- [192] V. Grimm. Klimaschutz als Industriepolitische Chance. CDU Wirtschaftsrat, 14.09.2020
- [193] V. Grimm. online Seminar „Climate Protection for European key industries“. Clean Energy Wire, 14.09.2020
- [194] V. Grimm. Konjunkturupdate und Diskussion zum Klimaschutz. Klausurtagung der Fraktion Die GRÜNEN des bayerischen Landtags, Regensburg, online Zuschaltung, 17.09.2020
- [195] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. Parlamentarische Frühstück, Berlin, 17.09.2020
- [196] V. Grimm. Klimaschutz als Chance für die Europäische Wettbewerbsfähigkeit. Unternehmensgrün, Berlin, 17.09.2020
- [197] S. Kretschmer. Market Design for Renewable Energy Auctions: An Analysis of Alternative Auction Formats. Verein für Sozialpolitik Jahrestagung 2020, 28.09.2020
- [198] R. Ismer. Carbon Border Adjustment Mechanism, BDI-Projektgruppe Carbon Border Adjustment 2021, 28.10.2020
- [199] V. Grimm. Gespräch mit der ZEIT-Journalistin Pia Pinzler zum Thema Nachhaltigkeit. ZEIT für Wissen, online-Konferenz.
- [200] V. Grimm. German ideology and the refoundation of Europe, Vortrag und Diskussion mit Moritz Schularik und Thomas Piketty. Forum New Economy.
- [201] V. Grimm. Introduction to H2.B and Hydrogen Alliance Bavaria. German Japanese Fuel Cell Conferenc, 11.11.2020
- [202] V. Grimm. Übergabe des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung an die Bundeskanzlerin, 11.11.2020
- [203] V. Grimm. Impuls auf dem Parteitag der Grünen, 12.11.2020
- [204] V. Grimm. Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, online an der WiSo, 12.11.2020
- [205] V. Grimm. Eröffnungspanel mit Hildegard Müller, VDA, Christian Buch, Siemens Energy, Kerstin Andrae, BDEW. Dena-Kongress, 16.11.2020, Berlin
- [206] V. Grimm. Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Einladung der Bayerischen Landesvertretung in Berlin, 17.11.2020
- [207] V. Grimm. Klimaschutz als Industriepolitische Chance. Hydrogen Dialogue, Nürnberg 18.11.2020
- [208] V. Grimm. Klimaschutz als Industriepolitische Chance. Chinesisch-Deutsche Wirtschaftskonferenz RSBK, 25.11.2020
- [209] R. Ismer. Einordnung [zu aktueller Rechtsprechung des BFH], 11. Deutscher Energiesteuertag 2020, 27.11.2020
- [210] V. Grimm. Klimaschutz als Industriepolitische Chance: Wasserstoff und Synfuels. ISWA Seminar auf Einladung des BDI, 08.12.2020
- [211] V. Grimm. Vorstellung des Jahresgutachtens des Sachverständigenrats, Klimaschutz als Industriepolitische Chance. EnCN Jahrestagung, 14.12.2020
- [212] L. Lang. Smart Markets als marktbasierter Ergänzung zum Redispatch. Interne EnCN Konferenz, 14.12.2020
- [213] V. Grimm. Recovery through the Green Deal? Vortrag und Diskussion. Konferenz Israel and the EU, 16.12.2020

- [214] J. Grübel. Existence of equilibria in energy markets with convex and nonconvex players. Trends in Mathematical Modelling, Simulation and Optimisation: Theory and Applications, 02.03.2021
- [215] J. Thürauf. Robust Sizing and the European entry-exit gas market. TOR-workshop, Hydrogen Networks, 08.03.2021
- [216] J. Thürauf. Maximal uncertainty sets in robust optimization. Trends in Mathematical Modelling, Simulation and Optimisation: Theory and Applications, 12.03.2021
- [217] P. Runge. Wasserstoff - Energieträger der Zukunft für Bayern. C.A.R.M.E.N. Forum 2021 „Wasserstoff im Fokus: Sektorenkoppler für Energie und Industrie, 15.03.2021
- [218] P. Runge. Zukunftsmarkt Wasserstoff „Momentaufnahme“ mit Impulsen aus Wissenschaft und Wirtschaft. BayernLB Podiumsdiskussion - Roundtable für die Energiewirtschaft, 17.03.2021
- [219] L. Lang. Flow-Based Market Coupling in Multi-Level Electricity Market Models. Enerday 2021, 09.04.2021
- [220] P. Runge. Hydrogen - Energy carrier of the future for Bavaria. H2 Global Partnership 2021, 12.04.2021
- [221] L. Lang. Flow-Based Market Coupling in Multi-Level Electricity Market Models. Young Energy Economists and Engineers Seminar 2021 (YEEES), 03.06.2021
- [222] L. Lang. Uncertainty in Electricity Markets: The German Case. IAEE Online Conference 2021, 10.06.2021
- [223] R. Ismer, Klimaschutz: Gestalterische Ansätze im Zoll- und Verbrauchsteuerrecht. Europäischer Zollrechtstag 2021, 17.06.2021
- [224] F. Liers. Data-Driven Optimization under Uncertainty. Kolloquium Algorithmic Optimization ALOP (Trier), 03.07.2021
- [225] J. Grübel. Long-run market equilibria in coupled energy sectors. 31st European Conference on Operational Research (EURO), 14.07.2021
- [226] J. Thürauf. Maximal Uncertainty Sets in Robust Optimization. Siam Conference on Optimization 2021, 21.07.2021
- [227] J. Grübel. On the Existence of Energy Market Equilibria with Convex and Nonconvex Players. 22nd Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), 27.08.2021
- [228] J. Grübel. On the Existence of Energy Market Equilibria with Convex and Nonconvex Players. Annual conference of the Operations Research Societies of Switzerland (SVOR), Germany (GOR e.V.) and Austria (ÖGOR) (OR 2021), 03.09.2021
- [229] F. Liers. Mixed-Integer Robust Optimization: Some Algorithms and Some Applications. Semiplenary International Conference on Operations Research, 03.09.2021
- [230] L. Lang. Modellierung von Smart Markets zur Lösung von Engpässen im Deutschen Übertragungsnetz. IEWT 2021, 08.09.2021
- [231] P. Runge. Wasserstoff - Energieträger der Zukunft für Bayern. vbw- Webinar Grünstrom und Wasserstoff: Potentiale identifizieren und realisieren, 14.10.2021
- [232] L. Lang. Preventive vs. Reactive Redispatch: The Concept of Grid Boosters, Infratrain 2021, 15.10.2021

## 7 Gutachten

- [G1] **Stärkung von Investitionen in Deutschland.** Bericht der Expertenkommission im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Energie, Berlin. Kommission: Fratzscher, M. (Vorsitz), S. Articus, F. Bsirske, R. Feiger, L. P. Feld, J. Fitschen, V. Grimm, R. Hoffmann, H. Jung, M. Kerber, W. Lemb, F.-J. Lersch-Mense, H.-H. Loewenstein, T. Mayer, T. Oletzky, S. Russwurm, M. Schnitzer, U. Schröder, H. Schwager, E. Schweitzer, M. Vassiliadis, T. R. Böger, F. Nauschnigg, T. Posselt, A. Bender, W. Eckart, S. Eide, D. Homann, A. Lieber, L. Schuknecht, B. Alm, R. L´Hoest, M. Meurers, U. Neuhäuser, P. Steinberg, S. Weins, J. Zettelmeyer, M. Gornig, C. Michelsen, B. Pagel und A. Schiersch, 2015.
- [G2] **Regionale Preiskomponenten im Strommarkt.** Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 71. Sondergutachtens Energie2015 der Monopolkommission. V. Grimm, G. Zöttl, B. Rückel und C. Sölch, 2015.
- [G3] **Dezentralität und zellulare Optimierung - Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf.** Gutachten im Auftrag der N-ERGIE AG. Grimm V., G. Zöttl, M. Ambrosius, B. Rückel, C. Sölch; gemeinsam mit der Prognos AG, 2016.

- [G4] **Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung.** Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017 der Monopolkommission. Grimm V., G. Zöttl, C. Sölch, 2017.
- [G5] **Stellungnahme und öffentliche Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energie- und des Stromsteuergesetzes** (Drsn. 18/11493, 18/11927) sowie zu einem von der Fraktion DIE LINKE. gesondert eingebrachten Änderungsantrag. Finanzausschuss des Deutschen Bundestages. Ismer R., 2017.
- [G6] **Filling gaps in the policy package to decarbonise production and use of materials.** K. Neuhoff, O. Chiappinelli, C. Bataille, M. Haußner, R. Ismer, E. Joltreau, I. Jürgens, C. Piantieri, J. Richstein, O. Sator, P. Singhal und J. Stede, London, 2018.
- [G7] **Building blocks for a climate-neutral European industrial sector. Policies to create markets for climate-friendly materials to boost EU global competitiveness and jobs.** K. Neuhoff, O. Chiappinelli, T. Gerres, M. Haussner, R. Ismer, N. May, A. Pirlot und J. Richstein, London, 2019.
- [G8] **Konjunkturprognose 2020 und 2021.** Sachverständigenrat zur Begutachtung der Gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Wiesbaden, 2020.
- [G9] **Corona-Krise gemeinsam bewältigen, Resilienz und Wachstum stärken.** Jahresgutachten 2020/21. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Wiesbaden, 2020.
- [G10] **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.
- [G11] **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, 2020.
- [G12] **Öffentliche Infrastruktur in Deutschland: Probleme und Reformbedarf.** Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2020.
- [G13] **Nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion ermöglichen. Empfehlungen für die Verbraucherpolitik.** Veröffentlichung des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen beim Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Berlin, 2020.
- [G14] **Study on the Possibility to Set up a Carbon Border Adjustment Mechanism on Selected Sectors. Final Report.** Le Den, X., Fallmann, H., Görlach, B., Ismer, R., Neuhoff, K., Stede, J., Steinmann, J., Brüssel, 2021.
- [G15] **Stellungnahme zum achten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für die Berichtsjahre 2018 und 2019.** Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin, Münster, Nürnberg, Stuttgart, 2021.
- [G16] **Transformation gestalten: Bildung, Digitalisierung und Nachhaltigkeit.** Jahresgutachten 2021/22. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Wiesbaden, 2021.

## 8 Veröffentlichungen

- [1] Aigner, K.-M., Clarner, J.-P., Liers, F., Martin, A., 2021. Robust Approximation of Chance Constrained DC Optimal Power Flow under Decision-Dependent Uncertainty. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.051>
- [2] Ambrosius, M., Egerer, J., Grimm, V., Weijde, A.H. van der, 2021. Risk Aversion in Multilevel Electricity Market Models with Different Congestion Pricing Regimes. *Energy Economics* 105, 105701. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105701>
- [3] Ambrosius, M., Egerer, J., Grimm, V., Weijde, A.H. van der, 2020. Uncertain bidding zone configurations: The role of expectations for transmission and generation capacity expansion. *European Journal of Operational Research* 285, 343–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.024>
- [4] Ambrosius, M., Grimm, V., Kleinert, T., Liers, F., Schmidt, M., Zöttl, G., 2020. Endogenous price zones and investment incentives in electricity markets: An application of multilevel optimization with graph partitioning. *Energy Economics* 92, 104879. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104879>
- [5] Ambrosius, M., Grimm, V., Sölch, C., Zöttl, G., 2018. Investment incentives for flexible demand options under different market designs. *Energy Policy* 118, 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.059>

- [6] Assembayeva, M., Egerer, J., Mendelevitch, R., Zhakiyev, N., 2019. Spatial electricity market data for the power system of Kazakhstan. Data in Brief 23, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103781>
- [7] Assembayeva, M., Egerer, J., Mendelevitch, R., Zhakiyev, N., 2018. A spatial electricity market model for the power system: The Kazakhstan case study. Energy 149, 762–778. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.011>
- [8] Bichler, M., Grimm, V., Kretschmer, S., Sutterer, P., 2020. Market design for renewable energy auctions: An analysis of alternative auction formats. Energy Economics 92, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104904>
- [9] Bohlayer, M., Bürger, A., Fleschutz, M., Braun, M., Zöttl, G., 2021. Multi-period investment pathways - Modeling approaches to design distributed energy systems under uncertainty. Applied Energy 285, 116368. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116368>
- [10] Bohlayer, M., Fleschutz, M., Braun, M., Zöttl, G., 2020. Energy-intense production-inventory planning with participation in sequential energy markets. Applied Energy 258, 113954. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113954>
- [11] Bohlayer, M., Zöttl, G., 2018. Low-grade waste heat integration in distributed energy generation systems - An economic optimization approach. Energy 159, 327–343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.095>
- [12] Böttger, T., Grimm, V., Kleinert, T., Schmidt, M., 2022. The cost of decoupling trade and transport in the European entry-exit gas market with linear physics modeling. European Journal of Operational Research 297, 1095–1111. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.034>
- [13] Burlacu, R., Egger, H., Groß, M., Martin, A., Pfetsch, M.E., Schewe, L., Sirvent, M., Skutella, M., 2019. Maximizing the storage capacity of gas networks: a global MINLP approach. Optimization and Engineering 20, 543–573. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9414-5>
- [14] Egerer, J., Grimm, V., Kleinert, T., Schmidt, M., Zöttl, G., 2021. The impact of neighboring markets on renewable locations, transmission expansion, and generation investment. European Journal of Operational Research 292, 696–713. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.10.055>
- [15] Geißler, B., Morsi, A., Schewe, L., Schmidt, M., 2018. Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods. INFORMS Journal on Computing 30, 309–323. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2017.0780>
- [16] Geißler, B., Morsi, A., Schewe, L., Schmidt, M., 2017. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. SIAM Journal on Optimization 27, 1611–1636. <https://doi.org/10.1137/16M1069687>
- [17] Grimm, V., Ambrosius, M., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2017. Modellierung von liberalisierten Strommärkten – Herausforderungen und Lösungen. Perspektiven der Wirtschaftspolitik 18, 2–31. <https://doi.org/10.1515/pwp-2017-0001>
- [18] Grimm, V., Grübel, J., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2020. Storage investment and network expansion in distribution networks: The impact of regulatory frameworks. Applied Energy 262, 114017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114017>
- [19] Grimm, V., Grübel, J., Schewe, L., Schmidt, M., Zöttl, G., 2019. Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. European Journal of Operational Research 273, 1097–1108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.016>
- [20] Grimm, V., Kleinert, T., Liers, F., Schmidt, M., Zöttl, G., 2019. Optimal price zones of electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches. Optimization Methods and Software 34, 406–436. <https://doi.org/10.1080/10556788.2017.1401069>
- [21] Grimm, V., Kretschmer, S., Mehl, S., 2020. Green innovations: The organizational setup of pilot projects and its influence on consumer perceptions. Energy Policy 142, 111474. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111474>
- [22] Grimm, V., Martin, A., Sölch, C., Weibelzahl, M., Zöttl, Gregor, G., 2022. Market-Based Redispatch May Result in Inefficient Dispatch. The Energy Journal 43. <https://doi.org/doi://10.5547/01956574.43.5>
- [23] Grimm, V., Orlinskaya, G., Schewe, L., Schmidt, M., Zöttl, G., 2021. Optimal design of retailer-prosumer electricity tariffs using bilevel optimization. Omega 102, 102327. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102327>
- [24] Grimm, V., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2021. The impact of market design on transmission and generation investment in electricity markets. Energy Economics 93, 104934. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104934>

- [25] Grimm, V., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2019. Regionally differentiated network fees to affect incentives for generation investment. *Energy* 177, 487–502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.035>
- [26] Grimm, V., Schewe, L., Schmidt, M., Zöttl, G., 2019. A multilevel model of the European entry-exit gas market. *Mathematical Methods of Operations Research* 89, 223–255. <https://doi.org/10.1007/s00186-018-0647-z>
- [27] Grimm, V., Schewe, L., Schmidt, M., Zöttl, G., 2017. Uniqueness of market equilibrium on a network: A peak-load pricing approach. *European Journal of Operational Research* 261, 971–983. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.036>
- [28] Gross, M., Pfetsch, M.E., Schewe, L., Schmidt, M., Skutella, M., 2019. Algorithmic results for potential-based flows: Easy and hard cases. *Networks* 73, 306–324. <https://doi.org/10.1002/net.21865>
- [29] Grübel, J., Kleinert, T., Krebs, V., Orlinskaya, G., Schewe, L., Schmidt, M., Thürauf, J., 2020. On electricity market equilibria with storage: Modeling, uniqueness, and a distributed ADMM. *Computers & Operations Research* 114, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104783>
- [30] Gugat, M., Leugering, G., Martin, A., Schmidt, M., Sirvent, M., Wintergerst, D., 2018. MIP-based instantaneous control of mixed-integer PDE-constrained gas transport problems. *Computational Optimization and Applications* 70, 267–294. <https://doi.org/10.1007/s10589-017-9970-1>
- [31] Gugat, M., Leugering, G., Martin, A., Schmidt, M., Sirvent, M., Wintergerst, D., 2018. Towards simulation based mixed-integer optimization with differential equations. *Networks* 72, 60–83. <https://doi.org/10.1002/net.21812>
- [32] Hante, F., Schmidt, M., 2019. Complementarity-based nonlinear programming techniques for optimal mixing in gas networks. *EURO Journal on Computational Optimization* 7, 299–323. <https://doi.org/10.1007/s13675-019-00112-w>
- [33] Haußner, M., 2021. Including Consumption into Emissions Trading - Economic and Legal Considerations. Edward Elgar Publishing, Elgar Studies in Climate Law.
- [34] Haußner, M., Ismer, R., 2018. Betrieb von Stromspeichern durch Verteilernetzbetreiber: Eine Analyse des aktuellen Entflechtungsregimes und der geplanten Änderungen durch das Winterpaket der Europäischen Kommission (im Erscheinen). *EnWZ - Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft* 7, 51–59.
- [35] Hiller, B., Koch, T., Schewe, L., Schwarz, R., Schweiger, J., 2018. A system to evaluate gas network capacities: Concepts and implementation. *European Journal of Operational Research* 270, 797–808. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.035>
- [36] Hübner, J., Schmidt, M., Steinbach, M.C., 2020. Optimization techniques for tree-structured nonlinear problems. *Computational Management Science* 17, 409–436. <https://doi.org/10.1007/s10287-020-00362-9>
- [37] Ismer R.; M. Haußner; K. Meßerschmidt; K. Neuhoff (2019). Sozialverträglicher CO<sub>2</sub>-Preis: Vorschlag für einen Pro-Kopf-Bonus im Rahmen des Krankenversicherungssystems. *Zeitschrift für Umweltrecht ZUR*, 664–675.
- [38] 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* 29, 2–5.
- [39] Ismer, R., 2021, Klimaschutz durch Steuern: Grundlagen und aktuelle Entwicklungen. *Die Unternehmensbesteuerung* 427–432.
- [40] Kleinert, T., Grimm, V., Schmidt, M., 2021. Outer approximation for global optimization of mixed-integer quadratic bilevel problems. *Mathematical Programming* 188, 461–521. <https://doi.org/10.1007/s10107-020-01601-2>
- [41] Kleinert, T., Labbé, M., Plein, F., Schmidt, M., 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>
- [42] Kleinert, T., Labbé, M., Plein, F., Schmidt, M., 2020. Technical Note—There’s No Free Lunch: On the Hardness of Choosing a Correct Big-M in Bilevel Optimization. *Operations Research* 68, 1716–1721. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1944>
- [43] Kleinert, T., Schmidt, M., 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>
- [44] Kleinert, T., Schmidt, M., 2019. Global optimization of multilevel electricity market models including network design and graph partitioning. *Discrete Optimization* 33, 43–69. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2019.02.002>
- [45] Krebs, V., Schewe, L., Schmidt, M., 2018. Uniqueness and multiplicity of market equilibria on DC power flow networks. *European Journal of Operational Research* 271, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.016>

- [46] Krebs, V., Schmidt, M., 2018. Uniqueness of market equilibria on networks with transport costs. *Operations Research Perspectives* 5, 169–173. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.05.002>
- [47] Kufner, T., Leugering, G., Martin, A., Medgenberg, J., Schelbert, J., Schewe, L., Stingl, M., Strohmeyer, C., Walther, M., 2019. Towards a lifecycle oriented design of infrastructure by mathematical optimization. *Optimization and Engineering* 20, 215–249. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9406-5>
- [48] Labbé, M., Plein, F., Schmidt, M., Thürauf, J., 2021. Deciding feasibility of a booking in the European gas market on a cycle is in P for the case of passive networks. *Networks* 78, 128–152. <https://doi.org/10.1002/net.22003>
- [49] Lang, L.M., Dallinger, B., Lettner, G., 2020. The meaning of flow-based market coupling on redispatch measures in Austria. *Energy Policy* 136, 111061. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111061>
- [50] Leugering, G., Martin, A., Schmidt, M., Sirvent, M., 2017. Nonoverlapping Domain Decomposition for Optimal Control Problems governed by Semilinear Models for Gas Flow in Networks. *Control and Cybernetics* 46, 191–225.
- [51] Liers, F., Schewe, L., Thürauf, J., 2021. Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems. *INFORMS Journal on Computing*. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2020.1030>
- [52] Mehrmann, V., Schmidt, M., Stolwijk, J.J., 2018. Model and Discretization Error Adaptivity Within Stationary Gas Transport Optimization. *Vietnam Journal of Mathematics* 46, 779–801. <https://doi.org/10.1007/s10013-018-0303-1>
- [53] Plein, F., Thürauf, J., Labbé, M., Schmidt, M., 2021. A bilevel optimization approach to decide the feasibility of bookings in the European gas market. *Mathematical Methods of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s00186-021-00752-y>
- [54] Reuß, M., Welder, L., Thürauf, J., Linßen, J., Grube, T., Schewe, L., Schmidt, M., Stolten, D., Robinius, M., 2019. Modeling hydrogen networks for future energy systems: A comparison of linear and nonlinear approaches. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 32136–32150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.080>
- [55] Robinius, M., Schewe, L., Schmidt, M., Stolten, D., Thürauf, J., Welder, L., 2019. Robust optimal discrete arc sizing for tree-shaped potential networks. *Computational Optimization and Applications* 73, 791–819. <https://doi.org/10.1007/s10589-019-00085-x>
- [56] Runge, P., Sölch, C., Albert, J., Wasserscheid, P., Zöttl, G., Grimm, V., 2019. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy* 233–234, 1078–1093. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.023>
- [57] Schewe, L., Schmidt, M., 2019. Computing feasible points for binary MINLPs with MPECs. *Mathematical Programming Computation* 11, 95–118. <https://doi.org/10.1007/s12532-018-0141-x>
- [58] Schewe, L., Schmidt, M., Thürauf, J., 2020. Computing technical capacities in the European entry-exit gas market is NP-hard. *Annals of Operations Research* 295, 337–362. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03725-2>
- [59] Schewe, L., Schmidt, M., Thürauf, J., 2020. Structural properties of feasible bookings in the European entry–exit gas market system. *4OR* 18, 197–218. <https://doi.org/10.1007/s10288-019-00411-3>
- [60] Schmidt, M., Aßmann, D., Burlacu, R., Humpola, J., Joormann, I., Kanelakis, N., Koch, T., Oucherif, D., Pfetsch, M., Schewe, L., Schwarz, R., Sirvent, M., 2017. GasLib—A Library of Gas Network Instances. *Data* 2, 40. <https://doi.org/10.3390/data2040040>
- [61] Schmidt, M., Sirvent, M., Wollner, W., 2019. A decomposition method for MINLPs with Lipschitz continuous nonlinearities. *Mathematical Programming* 178, 449–483. <https://doi.org/10.1007/s10107-018-1309-x>
- [62] Zoettl, G., 2021. Emission trading systems and the optimal technology mix. *SERIEs* 12, 281–327. <https://doi.org/10.1007/s13209-021-00233-9>

#### Preprints und eingereichte Arbeiten:

- [63] Adelhuetten, D., Biefel, C., Kuchlbauer, M., Rolfes, J., 2021. Pareto Robust optimization on Euclidean vector spaces. [arXiv:2109.03208 \[math\]](https://arxiv.org/abs/2109.03208).
- [64] Aigner, K.-M., Burlacu, R., Liers, F., Martin, A., 2020. Solving AC Optimal Power Flow with Discrete Decisions to Global Optimality. TRR 154 Working Paper.

- [65] Ambrosius, M., Grimm, V., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2021. Data Documentation for the German Electricity Market Used for the Calibration of the GATE Model - NDP 2030 (Version 2017). SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3832880>
- [66] Ambrosius, M., Grimm, V., Rückel, B., Sölch, C., Zöttl, G., 2019. Data Documentation for the German Electricity Market Used for the Calibration of the GATE Model - NDP 2025 (Version 2015). SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3365830>
- [67] Biefel, C., Liers, F., Rolfes, J., Schmidt, M., 2021. Affinely Adjustable Robust Linear Complementarity Problems. arXiv:2008.05784 [math].
- [68] Biefel, C., Liers, F., Rolfes, J., Schewe, L., Zöttl, G., 2021. Robust Equilibrium Problems. Arxiv:2108.09139 [math]
- [69] Burlacu, R., 2020. On Refinement Strategies for Solving MINLPs by Piecewise Linear Relaxations: A Generalized Red Refinement. Optimization Online.
- [70] Egerer, J., Grimm, V., Grübel, J., Zöttl, G., 2021. Long-run market equilibria in coupled energy sectors: A study of uniqueness. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3812255>
- [71] Garnadt N.; V. Grimm; W.H. Reuter (2020). Border carbon adjustment: Empirics, design and caveats, Arbeitspapier, Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden.
- [72] Grimm, V., Nowak, D., Schewe, L., Schmidt, M., Schwartz, A., Zöttl, G., 2020. A Tractable Multi-Leader Multi-Follower Peak-Load-Pricing Model with Strategic Interaction. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3656965>
- [73] Grimm, V., Sölch, C., Zöttl, G., 2021. Emissions reduction in a second-best world: On the long-term effects of overlapping regulations. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3904662>
- [74] Grübel, J., Huber, O., Hümbels, L., Klimm, M., Schmidt, M., Schwartz, A., 2021. Existence of energy market equilibria with convex and nonconvex players. Optimization Online.
- [75] Ismer, R., Neuhoff, K., Pirlot, A., 2020. Border Carbon Adjustments and Alternative Measures for the EU ETS: An Evaluation. DIW Discussion Paper 1855.
- [76] Ismer, R., van Asselt H., Haverkamp J., Mehling M., Neuhoff K., Pirlot A., 2021. Climate Neutral Production, Free Allocation of Allowances under Emissions Trading Systems, and the WTO – How to Secure Compatibility with the ASCM. DIW Discussion Paper 1948.
- [77] Krebs V.; M. Schmid (2019).  $\Gamma$ -Robust Linear Complementarity Problems. Optimization Online.
- [78] Krebs V.; M. Müller; M. Schmid (2019). Gamma-Robust Linear Complementarity Problems with Ellipsoidal Uncertainty Sets.
- [79] Kretschmer, S., Grimm, V., Mehl, S., 2018. Diffusion of Green Innovations: Evidence from a Field Study on Domestic Electricity Storage. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3122235>
- [80] Runge, P., Sölch, C., Albert, J., Wasserscheid, P., Zöttl, G., Grimm, V., 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>
- [81] Schewe, L., Schmidt, M., Thürauf, J., 2020. Global Optimization for the Multilevel European Gas Market System with Nonlinear Flow Models on Trees. Optimization Online.
- [82] Schwab, J., Sölch, C., Zöttl, G., 2021. Electric vehicle adoption in a market environment in 2035: The impact of market penetration and charging strategies. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3952648>
- [83] Thürauf, J., 2020. Deciding the Feasibility of a Booking in the European Gas Market is coNP-hard. Optimization Online.

#### Dissertationen:

- [84] Dr. Manuel Haußner: Including Consumption into Emissions Trading – Economic Rationality, EU Law Conformity, WTO Law Compatibility and Practical Administration (Betreuer: Prof. Dr. Roland Ismer)
- [85] Dr. Christian Sölch: The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investments in Liberalized Electricity Markets with Zonal Pricing (Betreuer: Prof. Dr. Veronika Grimm)
- [86] Dr. Bastian Rückel: The Impact of Market Design on the Coordination of Agents in Liberalized Electricity Markets (Betreuer: Prof. Dr. Gregor Zöttl)

- [87] Dr. Denis Aßmann: Exact Methods for Two-Stage Robust Optimization with Applications in Gas Networks (Promotion mit Energiebezug im TRR 154; Betreuer: Prof. Dr. Frauke Liers)
- [88] Dr. Robert Burlacu: Adaptive Mixed-Integer Refinements for Solving Nonlinear Problems with Discrete Decisions (Promotion mit Energiebezug im TRR 154; Betreuer: Prof. Dr. Alexander Martin)
- [89] Dr. Mirjam Ambrosius: Designing Sustainable Energy Systems: An Analysis of Different Market Configurations with Zonal Pricing via Multilevel Optimization (Erstbetreuerin: Prof. Dr. Veronika Grimm)
- [90] Dr. Julia Bellenbaum: On the Economics of Reliability in Electric Power Systems with High Shares of Renewables (Zweitbetreuerin: Prof. Dr. Veronika Grimm)
- [91] 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)
- [92] Dr. Thomas Kleinert: Algorithmic techniques for solving mixed-integer multilevel models in energy marked design. (Erstbetreuer: Prof. Dr. Alexander Martin, Zweitbetreuer: Prof. Martin Schmidt)
- [93] 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] 3. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Teilnehmer von: DIW Berlin, EnCN / FAU / ifo Institut / TU Berlin / TU München, an der FAU Erlangen-Nürnberg und am EnCN, 16.02.2017 – 17.02.2017
- [2] Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES). Zweitätiges Seminar mit 17 Präsentation von Doktoranden der Energiewirtschaft aus ganz Europa, <http://yees.eui.eu/nuremberg-2017/>, am EnCN Nürnberg, 27.04.2017 – 28.04.2017
- [3] KickOff-Veranstaltung des EnCN2-Projektes „Energiemarktdesign“, am EnCN Nürnberg, 05.05.2017
- [4] Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, am EnCN Nürnberg, 31.07.2017 & 27.10.2017
- [5] 3. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 26.01.2018
- [6] 4. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop (organisiert gemeinsam von Energie Campus Nürnberg / FAU Erlangen-Nürnberg / DIW Berlin / ifo Institut / TU Berlin / TU München), DIW Berlin, 22.02.2018 – 23.02.2018
- [7] 1. AIP-IIS-MLGT Workshop (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg / Fraunhofer IIS / AI / RIKEN-AIP), Georgia Tech in Atlanta (US), 06.03.2018 – 07.03.2018
- [8] 4. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 20.04.2018
- [9] 5. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 20.07.2018
- [10] 2. Konferenz „Mathematics of Gas Transport“ (organisiert gemeinsam vom TRR154 und dem Forschungscampus Modal), Zuse Institut Berlin, 10.10.2018 – 11.10.2018
- [11] 6. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 26.10.2018
- [12] Konferenz „Gender Economics and the Workplace“, FAU Erlangen-Nürnberg, 08.11.2018 – 09.11.2018
- [13] „Friday@Noon - Bavarian Workshop on Optimization“ (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg und Universität Augsburg), Universität Augsburg, 16.11.2018
- [14] 7. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 17.01.2019
- [15] 5. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop (organisiert gemeinsam von Energie Campus Nürnberg, FAU Erlangen-Nürnberg, DIW Berlin, ifo Institut, TU Berlin und TU München), ifo München, 21.02.-22.02.2019.
- [16] 8. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 10.05.2019
- [17] NUEdialog 2019: Panel „Die Mobilitätswende: Antriebe der Zukunft“, Nürnberg, 23.05.2019
- [18] „Friday@Noon - Bavarian Workshop on Optimization“ (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg, Universität Augsburg und TU München), Energie Campus Nürnberg, 12.07.2019
- [19] Konferenz: „The Potential of Hydrogen in a Decarbonized Energy Economy“, veranstaltet vom Energie Campus Nürnberg (EnCN) und dem Mannheim Institute for Sustainable Energy Studies (MISES), Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), Energie Campus Nürnberg, 17.10.2019
- [20] 9. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 06.12.2019

- [21] EnCN-Jahreskonferenz 2020, Nürnberg, 14.12.2020
- [22] Internationale virtuelle Konferenz „Trends in Mathematical Modelling, Simulation and Optimisation: Theory and Applications“, online, 02.03.2021 & 03.03. 2021.

---

## 10 Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten

---

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

- [1] CMTS-Master-Seminar „Fünf Jahre nach Fukushima–Energiewende Quo Vadis: Dezentrale Antworten für eine globale Herausforderung?“ Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2016/2017
- [2] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [3] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [4] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2017
- [5] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [6] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [7] Vorlesung Internationales Steuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [8] Vorlesung Optimierung von Versorgungsnetzen. PD Dr. Lars Schewe / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2017
- [9] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [10] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [11] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [12] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2017/2018
- [13] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2017/2018
- [14] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [15] Vorlesung Abgabenordnung. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [16] Vorlesung Umsatzsteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [17] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [18] Vorlesung Advanced Mathematics for Economists. Prof. Dr. Martin Schmidt. Wintersemester 2017/2018
- [19] Vorlesung Optimization in Industry and Economy. Prof. Dr. Martin Schmidt. Wintersemester 2017/2018
- [20] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2017/2018
- [21] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2017/2018
- [22] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [23] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2018
- [24] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [25] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [26] Vorlesung Internationales Steuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [27] Vorlesung Optimierung von Versorgungsnetzen. PD Dr. Lars Schewe / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2017
- [28] Seminar Energieoptimale Steuerung von Zugfahrten in einem U-Bahnnetz. Prof. Dr. Frauke Liers / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2018.
- [29] Vorlesung Lineare Komplementaritätsprobleme. Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2018.
- [30] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [31] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [32] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [33] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2018/2019
- [34] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2018/2019.
- [35] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2018/2019

- [36] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [37] Vorlesung Abgabenordnung. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [38] Vorlesung Umsatzsteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [39] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [40] Vorlesung Advanced Mathematics for Economists. Prof. Dr. Alexander Martin. Wintersemester 2018/2019
- [41] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2018/2019
- [42] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2018/2019
- [43] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [44] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2019
- [45] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2019
- [46] Vorlesung Discrete Optimization II. Prof. Dr. Alexander Martin. Sommersemester 2019
- [47] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [48] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [49] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [50] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2019/2020
- [51] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2019/2020
- [52] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2019/2020
- [53] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020
- [54] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2019/2020
- [55] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2019/2020
- [56] Vorlesung Mathematical Optimization for Communications & Signal Processing. Prof. Dr. Frauke Liers. Wintersemester 2019/2020
- [57] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020
- [58] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020
- [59] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- [60] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2020
- [61] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2020
- [62] Vorlesung Numerical Aspects of Linear and Integer Programming. Prof. Dr. Alexander Martin. Sommersemester 2020
- [63] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- [64] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- [65] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2020
- [66] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2020/2021
- [67] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2020/2021
- [68] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2020/2021
- [69] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021
- [70] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2020/2021
- [71] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2020/2021
- [72] Vorlesung Mathematical Optimization for Communications & Signal Processing. Prof. Dr. Frauke Liers. Wintersemester 2020/2021
- [73] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021
- [74] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2020/2021
- [75] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2021
- [76] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2021
- [77] Vorlesung Abgabenordnung. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2021
- [78] Vorlesung Umsatzsteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2021
- [79] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2021
- [80] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2021

- [81] Vorlesung Wettbewerbstheorie und -politik. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2021
- [82] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2021
- [83] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2021/2022
- [84] Vorlesung Economics of Climate Change. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2021/2022
- [85] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Xiaoyu Zhou. Wintersemester 2021/2022
- [86] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2021/2022
- [87] Vorlesung Einkommenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2021/2022
- [88] Vorlesung Mathematical Optimization for Communications & Signal Processing. Prof. Dr. Frauke Liers. Wintersemester 2021/2022
- [89] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2021/2022
- [90] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2021/2022
- [91] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2021/2022 Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2021/2022
- [92] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2021/2022

**Betreute Bachelorarbeiten:**

- [1] Umstellung des Fördersystems im Erneuerbare-Energien-Gesetz: wettbewerbliche Ausschreibung von Windenergiekapazitäten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Kernkraft in Frankreich: Renaissance oder schleichender Ausstieg durch Erneuerbare. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Europäische Emissionsstandards für Kohlekraftwerke - ökonomische Analyse der Auswirkung auf den deutschen Strommarkt. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [4] Flexibilisierung von Nachfrage vs. Netzausbau in Verteilnetzen. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [5] EU-Winterpackage vs. Weißbuch der Energie - ein Vergleich. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [6] Ökonomische Analyse und Bewertung eines verringerten Energieverbrauchs durch Effizienzsteigerungen. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [7] Strukturelle Einflüsse eines gestiegenen Elektromobilitätsaufkommens. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [8] Die Entwicklung, Ausgestaltung und Einflussgrößen des europäischen Emissionszertifikatshandels seit Entstehung. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [9] Netzstabilitätsanlagen als eine Übergangslösung um Netzendpässe durch den Atomausstieg und den verzögerten Stromnetzausbau in Deutschland im Rahmen der Energiewende zu vermeiden. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Förderung der erneuerbaren Energien nach EEG und Richtlinien zum Einspeisemanagement. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Diskussion eines wissenschaftlichen Fachartikels zu „Regulation of network infrastructure investments“. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [12] Kernkraft in Frankreich: Renaissance oder schleichender Ausstieg durch Erneuerbare. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [13] Synthetisches Methan als Automobilkraftstoff der Zukunft. Ein wirtschaftlicher Vergleich zu flüssigen Alternativen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [14] Soziale Interaktionseffekte in der Verbreitung neuer Technologien im Energiebereich. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [15] Auswirkungen von Elektromobilität auf die Verteilernetzinfrastruktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [16] Indiens Stromsektor im Wandel von Kohleverstromung zu PV und Wind. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [17] Entwicklung und Perspektiven der EEG Umlage. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [18] Marktmacht im Strommarkt – Überblick und Bewertung für Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [19] A Heuristic for Linear Bilevel Problems based on Penalty Alternating Direction Methods. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [20] Eindeutigkeit von Nash-Cournot-Gleichgewichten auf Netzwerken. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [21] Negative Strombörsenpreise und der Einfluss der Erneuerbaren Energien. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [22] Diskussion eines wissenschaftlichen Fachartikels zu „Regulierung von Energiemärkten“. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [23] Wie viel Speicher braucht die Deutsche Energiewende? Prof. Dr. Gregor Zöttl

- [24] Vergleich der Ökobilanzen von wasserstoff- und batterieelektrischer Mobilität anhand einer Lebenszyklusanalyse. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [25] Vergleich verschiedener E-Fuels in einem Szenario für 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [26] Prosumage von Privathaushalten mittels Photovoltaikanlagen mit Batteriespeichern. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [27] Entwicklung und Perspektiven der EEG Umlage. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [28] Auswirkungen von Elektromobilität auf die Verteilernetzinfrastruktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [29] Mentale Rebound-Effekte bei Effizienzsteigerungen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [30] Guter Wille, kleine Wirkung? Der Einfluss des Umweltbewusstseins auf die persönliche CO<sub>2</sub>-Bilanz. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [31] Determinanten des Wechselverhaltens von Endkunden im Energiesektor. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [32] Klimaneutrale Energieszenarien für Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [33] Carbon taxation: Options for avoiding regressivity. Prof. Dr. Roland Ismer
- [34] Vergleich der Ökobilanzen von wasserstoff- und batterieelektrischer Mobilität anhand einer Lebenszyklusanalyse. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [35] Vergleich verschiedener E-Fuels in einem Szenario für 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [36] Wie viel Speicher braucht die Deutsche Energiewende? Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [37] Die Bedeutung und Verwendung von Informationen in Smart Grids. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [38] Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffspeichern in einem Energieszenario 2030. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [39] Bewertung verschiedener Speichertechnologien in erneuerbaren Strommärkten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [40] Die Akzeptanz von Windenergieanlagen – NIMBY, Nocebo und Beteiligungsmöglichkeiten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [41] Mobilitätswende zum Erreichen der Klimaziele im Verkehrssektor – Bewertung von wasserstoff- und batterieelektrischen Mobilitätskonzepten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [42] Geschäftsmodelle für Photovoltaiksysteme mit Batteriespeicher für kleine Industriebetriebe. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [43] A Carbon Tax for Europe? Prof. Dr. Roland Ismer
- [44] Greening the German Income Tax Act. Prof. Dr. Roland Ismer
- [45] Revising the EU Energy Taxation Directive. Prof. Dr. Roland Ismer
- [46] Industry Exemptions under Carbon Pricing Schemes. Prof. Dr. Roland Ismer
- [47] The EU New Green Deal: Border Carbon Adjustments. Prof. Dr. Roland Ismer
- [48] Bewertung verschiedener Speichertechnologien in erneuerbaren Strommärkten. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [49] Aktuelle Entwicklungen im Deutschen Regelenergiemarkt. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [50] Ansätze und Beispiele der Implementierung einer CO<sub>2</sub>-Steuer. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [51] Wasserkraft in Skandinavien als Batterie für Windstrom aus dem Nordseeraum. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [52] PV-Batteriespeicher in Deutschland: Die Wirtschaftlichkeit aus Haushaltssicht. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [53] Nationale und europäische Strategien für die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [54] Kohleausstieg und Kompensationszahlungen – Eine kritische Bewertung. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [55] Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Haushaltssektor: Potenziale und Probleme. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [56] Ansätze und Herausforderungen für CO<sub>2</sub> Zertifikate aus der Forstwirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [57] Strategisches Bieterverhalten in Strommärkten mit zonalen Preisen und marktbasierendem Redispatch. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [58] Die individuelle CO<sub>2</sub>-Bilanz: Stärken und Schwächen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [59] Nachhaltigkeit bei der Produktion von grünem Wasserstoff. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [60] Herausforderungen und Lösungsansätze für Carbon Leakage im Rahmen des EU Green Deal. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [61] Diffusion von PV-Batteriespeichern in Deutschland: Status quo und Ausblick. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [62] Ein approximativer Schnittebenenansatz für robuste Optimierung mit Anwendung auf das Gastransportproblem. Prof. Dr. Frauke Liers

**Betreute Masterarbeiten:**

- [1] Stochastische Optimierung zur Integration von Unsicherheiten in die Strommarktmodellierung: Auswirkungen unsicherer CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise und Netzausbaukosten auf Investitionsentscheidungen im deutschen Strommarkt. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Stochastische Optimierung in der Strommarktmodellierung: Netzausbau und Erzeugungsinvestitionen unter Unsicherheit hinsichtlich der Ausgestaltung von Preiszonen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Discrete Selection of Diameters for Constructing Optimal Hydrogen Pipeline Networks. PD Dr. Lars Schewe
- [4] Mathematische Modellierung von Stromnetzen: Ein Vergleich von AC und DC-Modell hinsichtlich Investitionsentscheidungen. Prof. Dr. Frauke Liers
- [5] On the uniqueness of competitive market equilibria on DC networks. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [6] Instruments to meet international environmental policy goals and their impacts on energy markets. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [7] Electricity Pricing and Congestion Management Regimes. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [8] Die Anreizwirkung staatlicher Steuerungsinstrumente zur Reduzierung der Flottenemissionen in der Automobilbranche. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [9] Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Eine Vorstellung und ökonomische Bewertung der neuen Regelungen des EEG. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Transformation of the German electricity system in a European context. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [12] Analyse der Kosten batterieelektrischer Mobilität mit Fokus auf die Verteilnetzinfrastuktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [13] Bidding Zones for the European Electricity Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [14] Graphpartitionierungen für Alternating Direction Methods mit Anwendungen auf Gasnetze. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [15] Bilevelproblem des europäischen Gasmarktes. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [16] Mixed integer moving horizon control for flexible energy storage systems. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [17] Ein Moving-Horizon-Ansatz für mehrstufige stochastische Portfolio-Optimierung mit langfristigen und illiquiden Infrastrukturinvestitionen. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [18] Robustifizierungen von Gleichgewichtsproblemen im Strommarkt. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [19] Eine Vorstellung und ökonomische Bewertung der neuen Regelungen des EEG. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [20] Sustainable strategies and multilateral cooperation for the energy systems in Central Asia. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [21] Flexibilisierung für das zukünftige Strommarktdesign – Eine mehrstufige Optimierung zur Analyse der Investitionsanreize und Wechselwirkungen von Flexibilitätsoptionen. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [22] Es weht ein frischer Wind durch Deutschland – Herausforderungen von Power Purchase Agreements für Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [23] Multilevel Model for Joint Analysis of Electricity and Gas Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [24] The value of flexibility in industrial electricity demand – A model-based evaluation for the German electricity market. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [25] Ein mehrstufiges Modell zur Analyse von robustheitsbedingten Ineffizienzen im europäischen Entry-Exit-Gasmarkt. Prof. Dr. Frauke Liers / Prof. Dr. Veronika Grimm
- [26] AC Optimal Power Flow with Chance Constraints. Prof. Dr. Frauke Liers
- [27] A Temporal Decomposition Approach of Energy Systems Models using Lagrangian Relaxation. Prof. Dr. Alexander Martin
- [28] Presolve-Verfahren für Lineare Bilevelprobleme. Prof. Dr. Alexander Martin
- [29] Gamma-robust linear complementarity problems under ellipsoidal uncertainty with applications to the traffic equilibrium problem. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [30] Kosteneffizienter Betrieb von Smart Grids mit Gomory Schnittebenen. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [31] Mixed integer moving horizon control for flexible energy storage systems. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [32]  $\Gamma$ -robust linear complementarity problems under ellipsoidal uncertainty with application to the traffic equilibrium problem. Prof. Dr. Martin Schmidt

- [33] Modelling Balancing Energy Markets. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [34] Markt- und netzorientierter Einsatz nachfrageseitiger Flexibilität durch Smart Meter. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [35] Analysis of Bidding Zones in Europe. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [36] CO<sub>2</sub>-Bepreisung und Vermeidung von Carbon Leakage. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [37] Alternative drives: Vehicle purchase decisions under different market design scenarios. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [38] The value of flexibility in industrial electricity demand – A model-based evaluation for the German electricity market. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [39] Techno-Ökonomische Analyse zur Einsatzoptimierung von wasserstoff- und batterieelektrischen Bussen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [40] Ein mehrstufiges Modell zur Analyse von robustheitsbedingten Ineffizienzen im europäischen Entry-Exit-Gasmarkt. Prof. Dr. Frauke Liers
- [41] Optimierung über Entscheidungsbäumen - Mit Anwendung auf die Stabilität von Gleichstromnetzen. Prof. Dr. Frauke Liers
- [42] A temporal decomposition approach of energy systems models using langrangian relaxation. Prof. Dr. Alexander Martin
- [43] Solving Mixed-Integer Problems using Machine Learning for the Optimization of Energy Production. Prof. Dr. Alexander Martin
- [44] Presolve-Verfahren für Lineare Bilevelprobleme. Prof. Dr. Alexander Martin
- [45] Optimization models for adaptive energy supply in critical infrastructures during power outages. Prof. Dr. Alexander Martin
- [46] CO<sub>2</sub>-Bepreisung und Vermeidung von Carbon Leakage. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [47] Alternative drives: Vehicle purchase decisions under different market design scenarios. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [48] Aufbau eines statischen Modells zur Vertifikation der Kapazität für das Flow-Based Day-Ahead Market Coupling. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [49] Modellbasierte Analyse von Investitionsentscheidungen im deutschen Strommarkt mit negativen Spotmarktpreisen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [50] Carbon pricing versus subsidization of renewables: an economic policy impact assessment. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [51] Techno-economic Analysis on Importing Green Ammonia to Germany - Case Study for Australia Prof. Dr. Veronika Grimm
- [52] Robust optimization for transient gas transport problems. Prof. Dr. Frauke Liers
- [53] Robust Dynamic Flows: Study of Theoretical and Computational Aspects. Prof. Dr. Frauke Liers
- [54] Implementing a charge on carbon-intensive materials in the United States. Prof. Dr. Roland Ismer
- [55] Energy Taxation – Scope and Exemption. Prof. Dr. Roland Ismer

VERTRAULICH - WEITERGABE AN DRITTE NICHT GESTATTET

FORSCHUNGSBEREICH

# Erneuerbare Energien



Sprecher des Forschungsbereichs

**Prof. Dr. Christoph Brabec**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

E-Mail  
[christoph.brabec@fau.de](mailto:christoph.brabec@fau.de)

Telefon  
+49 9131 / 9398 100

Web  
[www.encn.de/EET](http://www.encn.de/EET)

# EE-Technologien im urbanen Umfeld - EET

## Projektbericht 2017 - 2021

Gebäude sind für ca. 40 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs und einen damit verbundenen erheblichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß verantwortlich, während die regenerative Energieerzeugung oft den Nachteil aufweist, dass sie fernab vom Verbraucher stattfindet. Das Ziel dieses Projekts bestand darin, innovative Technologien auf der Basis gedruckter Optoelektronik für die Erhöhung der Gebäudeeffizienz zur Verfügung zu stellen, die es ermöglichen, Energieverluste zu vermeiden bzw. Energie dort zu erzeugen, wo sie benötigt wird. Allein in Deutschland sind mehrere Hundert Quadratkilometer Fassadenfläche für die Integration von Photovoltaik geeignet, was urbane Bereiche zu Kraftwerken machen würde. Um diese bisher ungenutzten Flächen zu erschließen, wurden im Rahmen dieses Projekts die einzigartigen Eigenschaften der gedruckten Photovoltaik genutzt, um eine kostengünstige, optisch ansprechende und anpassungsfähige Alternative für die gebäudeintegrierte Photovoltaik zu entwickeln.

Im **Projektteil TP1 – 2D und 3D Beschichtungstechnologien (Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf)** wurden 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)** wurden neue bildgebende optische Verfahren zur inline Qualitätskontrolle von PV-Modulen entwickelt.

Im **Projektteil TP3 – smarte und schaltbare Fenster (Prof. Dr. Wolfgang Heiss)** wurden smarte Materialien für die Herstellung von spektral-schaltbaren Fenster entwickelt.

Im **Projektteil TP4 – Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld (Priv.-Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Prof. Dr. Christoph Brabec)** wurden auf Grundlage der Ergebnisse aus TP1 druckbare Photovoltaikmodule für die Gebäudeintegration entwickelt.

### KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR  
**Prof. Dr. Christoph Brabec**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Bayerisches Zentrum für  
Angewandte Energieforschung



**E-Mail**  
Christoph.brabec@fau.de

**Telefon**  
+49 9131 9398 100

**Web**  
[www.encn.de](http://www.encn.de)

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

## 1.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: ZAE Bayern

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

## 1.2 Arbeiten und Ergebnisse

Grundsätzlich müssen alle PV-Module, unabhängig von Technologie und Anwendung, die Anforderungen des magischen Dreiecks aus geringen Kosten, hoher Effizienz und langer Lebensdauer gleichzeitig erfüllen. Bei Solarmodulen für das urbane Umfeld kommen noch besondere Anforderungen hinsichtlich Ästhetik und Integrierbarkeit hinzu, so dass sich ein magisches Fünfeck ergibt. Im Laufe des EET-Teilprojekts 1 wurden alle fünf Zielaspekte erfolgreich bearbeitet, wie in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt. Hinsichtlich der Effizienz hält das ZAE Bayern mit 11,7% den Weltrekord für OPV-Module mit mehr als 100 cm<sup>2</sup> Fläche (s. Jahresbericht 2019). Die Kosten für die Herstellung konnten durch die Entwicklung geeigneter Prozesse und der dazu notwendigen Geräte minimiert werden (s. bspw. Jahresbericht 2020). Entwicklung und Vertrieb solcher „turn-key“-Konzepte ist auch das Geschäftsmodell der Fa. Sciprios GmbH, die im Jahre 2018 aus dem EnCN ausgegründet wurde. Die Lebensdauer der Module wurde durch systematische Analyse der Degradationsursachen und daraus abgeleiteter Gegenmaßnahmen, wie z.B. der Entwicklung stabilisierender Additive sowie druckbarer Verkapselungen erheblich verlängert (s. Jahresberichte 2019 und 2020). In beschleunigten Alterungstests nach den Normen ISOS-L2 und ISOS-D3 wurden Lebensdauern von über 500 Stunden bzw. von über 1000 Stunden gemessen (s. Jahresbericht 2020). Die Beobachtung von Modulen im Außenbereich hat nun auch gezeigt, dass die Module über den Zeitraum eines Jahres keine messbare Degradation aufweisen (s. Abschnitt 4.2.1).

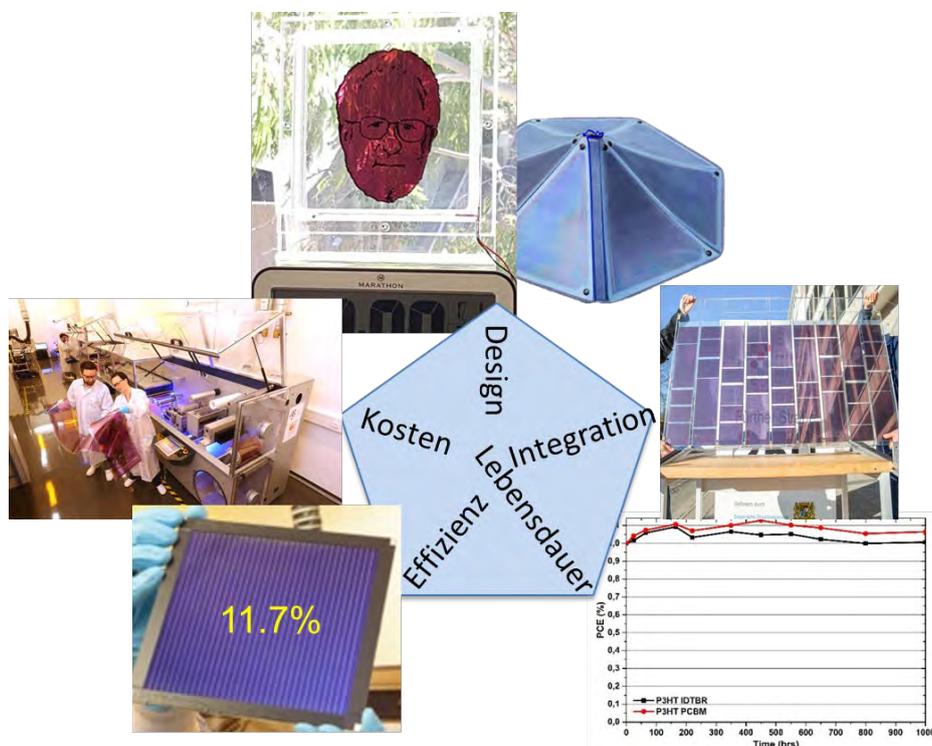


Abbildung 1: Magisches Fünfeck für BIPV-Module mit den am ZAE Bayern entwickelten Antworten auf die jeweiligen Herausforderungen. Kostensenkung: Hochdurchsatz-Produktion durch R2R-Druck. Effizienzsteigerung: OPV-Weltrekordmodul. Verlängerung der Modul-Lebensdauer durch systematische Optimierung der aktiven Schicht und der Verpackung. Optimierung der Integration unter Ausnutzung der einzigartigen Eigenschaften der gedruckten PV. Spektakuläres Design durch Entwicklung neuartiger Druck- und Laserstrukturierungsverfahren.

Auf die Ästhetik der OPV-Module wurde besonderes Augenmerk gerichtet, um sie für die Anwendung in Gebäudefassaden attraktiv zu machen. Da sichtbare Elektroden die Ästhetik der Module massiv beeinträchtigen würden, wurden sie durch konsequenten Einsatz vollständig transparenter Elektroden aus Silbernanodrähten (AgNW) ersetzt. Optisch auffällige Verschaltungsbereiche einzelner Zellen zu Modulen wurden entweder durch Laserstrukturierung oder tintenstrahlgedruckte Silberkontaktlinien („shy interconnects“) eliminiert. Durch die Kombination transparenter leitfähiger Metalloxide (TCO) als untere Elektrode mit AgNW als obere Elektrode können semitransparente Solarmodule hergestellt werden. In dieser Berichtsperiode gelang es, TCO als Material für die untere Elektrode von Modulen ebenfalls durch AgNW zu ersetzen, wodurch das in den TCOs vorhandene seltene Element Indium nicht mehr benötigt wird. Verschiedene Farben der Module, auch der semitransparenten, lassen sich durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien für die aktive Schicht erzielen. Durch den Einsatz digitaler Techniken, z.B. der Laserstrukturierung und insbesondere des Tintenstrahldrucks, können organische Solarmodule beliebiger Form erzeugt werden.

Obwohl die Projektziele vollständig erreicht wurden und die dabei gewonnenen Kenntnisse und Fertigkeiten für die großskalige Fertigung von OPV-Modulen für die Integration in eine BIPV-Demonstrationsfassade eingesetzt werden konnten (s. Abschnitt 4.2), besteht weiterhin die Notwendigkeit zur Verbesserung von Materialien und Prozessen. Im vergangenen Projektjahr wurden daher Methoden zur Reinigung der Module während der Rolle-zu-Rolle-Laserstrukturierung, zur Optimierung der Beschichtungsprozesse mittels numerischer Methoden und für die in-line Qualitätskontrolle mittels photoinduzierter Absorption entwickelt.

### 1.2.1 Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-Schneestrah-Verfahrens zur Entgratung laserstrukturierter Metalloxid-Elektroden

Die notwendige Laserstrukturierung der Frontelektrode in hocheffizienten gedruckten Solarmodulen hat zur Folge, dass sich entlang der Strukturierungskanten leitfähige Zacken bis zu einer Höhe von 2-3  $\mu\text{m}$  aufstellen (Abbildung 2). Wegen der geringen Schichtdicke ( $< 1 \mu\text{m}$ ) der aktiven Schicht in organischen und Perowskit-basierten Solarzellen führt dies zu Kurzschlüssen zwischen Front- und Rückelektrode, wodurch die Effizienz eines Solarmoduls drastisch verringert wird.

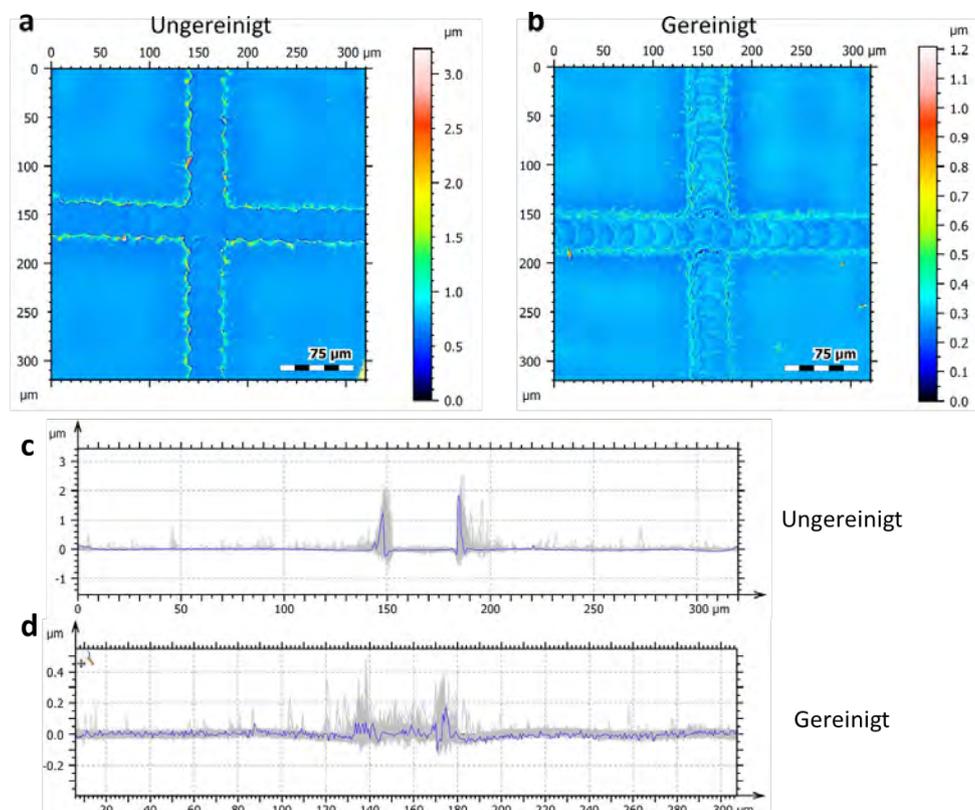


Abbildung 2: Konfokalmikroskopbilder und Höhenscans von gelaserten Strukturierungslinien auf der IMI-Elektrode. Ungereinigte Linien weisen Grate bis zu einer Höhe von 2-3  $\mu\text{m}$  auf (a,c). Die Zacken entlang der per Hand mit speziellen Mikrofasertücher gereinigten Linien sind weniger als 0.5  $\mu\text{m}$  hoch (b,d).



Abbildung 3: Prototypen Düsen-Array für die CO<sub>2</sub>-Schneestrahlnreinigung von bis zu 10 cm breiten Substraten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

Die notwendige Beseitigung bzw. Verringerung der Zacken wird in der (Pilot-)Produktion bisher in nicht industriekompatibler Weise unter hohem Personalaufwand durch versierte technische Angestellte mechanisch durchgeführt. Um eine wirtschaftliche Serienproduktion ohne Einsatz gesundheitsschädlicher Reinigungsmittel zu ermöglichen, wird im Rahmen eines ZIM-Projekts ein vollautomatisiertes CO<sub>2</sub>-Schneestrahln Reinigungssystem entwickelt, welches effizient und kostengünstig die Zacken entlang der Laserstrukturierungskanten in einem Rolle-zu-Rolle Verfahren abtragen kann. Auf einer Prototypen-Anlage konnte bereits verifiziert werden, dass sich bei einem 10 cm breiten Substrat und einer Geschwindigkeit von 1 m/min die Grate zuverlässig entfernen lassen (Abbildung 3 und Abbildung 4) und die Solarzellen dadurch keine Kurzschlüsse aufweisen (Abbildung 5). Dieser Prozess wird nun auf 30 cm Breite und min. 2 m/min aufskaliert, um den Prozess für eine vollumfängliche industrielle Anwendung zu entwickeln.

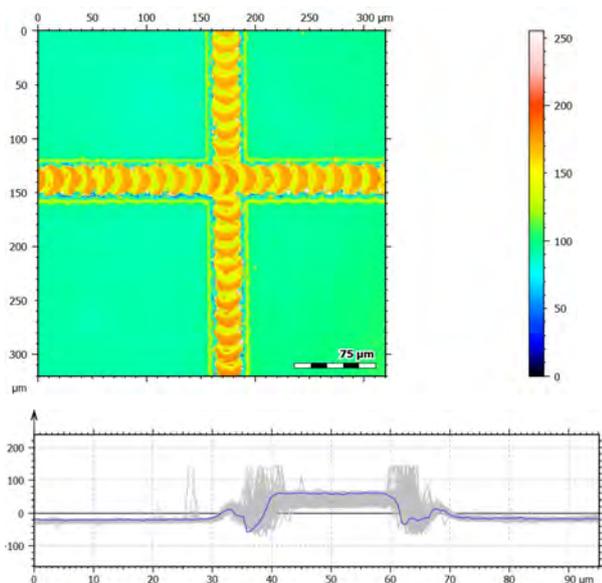


Abbildung 4: Laserlinien nach der CO<sub>2</sub>-Schneestrahln Reinigung weisen Grate von nur noch ca. 100 - 150 nm Höhe auf.

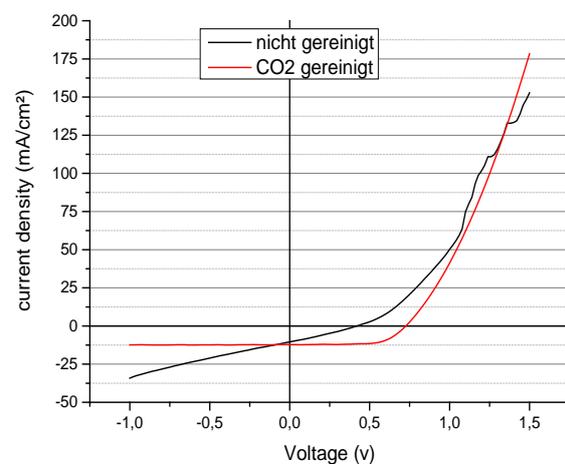


Abbildung 5: IV Kennlinie einer Solarzelle bei der das Substrat nicht (schwarz) bzw. mittels CO<sub>2</sub>-Schneestrahln gereinigt wurde (rot).

### 1.2.2 Entwicklung eines mathematischen Modells für Rakel-Prozesse

Eines der populärsten Beschichtungsverfahren im Labormaßstab ist das Rakeln, das darüber hinaus auch als Modellprozess für skalierbare Beschichtungsverfahren wie den Schlitzguss dient. Beim Rakeln wird die Lösung des Filmmaterials in den Spalt zwischen Rakel und Substrat eingespritzt und die Rakel dann mit konstanter Geschwindigkeit über das Substrat gezogen. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels bleibt ein Film zurück, der auf kurzen Längenskalen sehr homogen sein kann. Auf größere Rakeldistanzen wird jedoch aufgrund der Abnahme der Flüssigkeitsmenge im Spalt zwischen Rakel und Substrat eine deutliche Abnahme der Schichtdicke beobachtet, was sowohl optisch als auch elektrisch zu Beeinträchtigungen der Qualität der Solarmodule führt.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Beschichtungsprozesses von Dünnschichten mittels Rakelverfahren entwickelt. Mithilfe dieses Modells lässt sich die Schichtdicke in Abhängigkeit der Rakelgeschwindigkeit und der eingespritzten Lösungsmenge exakt vorhersagen (Abbildung 6) und somit maximale Prozesskontrolle erlangen. Darüber hinaus lässt sich das Modell dafür verwenden, ein Beschleunigungsprofil für den Rakelprozess zu berechnen, welches eine Beschichtung mit konstanter Schichtdicke über große Distanzen ermöglicht. Auf diese Art und Weise konnten die großflächigen organischen Photovoltaik (OPV)-Module für die „Jubiläumsringe“ (Abbildung 7) mit drei verschiedenen organischen Halbleitern unterschiedlicher Farbe hergestellt werden.

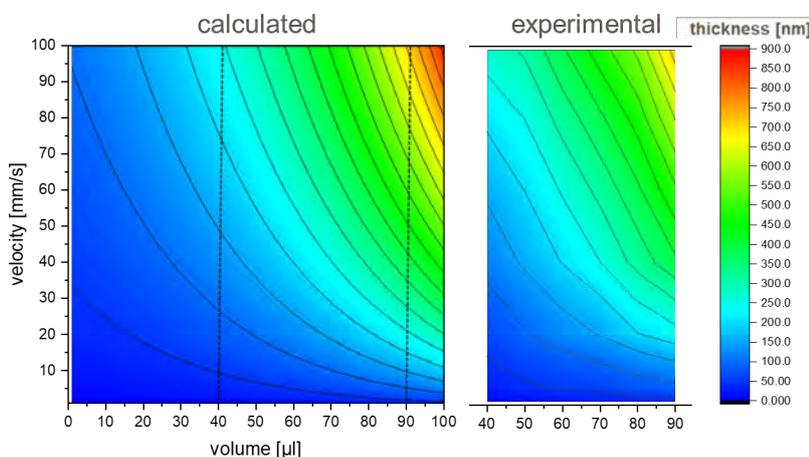


Abbildung 6: Berechnete (links) und experimentell bestimmte (rechts) Schichtdicke gerakelter Dünnschichten in Abhängigkeit von Rakelgeschwindigkeit und eingespritzter Lösungsmenge.



Abbildung 7: Mittels beschleunigtem Rakelprozess hergestellte großflächige OPV-Module.

### 1.2.3 Inline-Qualitätskontrolle mittels photoinduzierter Absorptionsspektroskopie

Bei der Entwicklung von gedruckter Photovoltaik (PV) aus organischen Materialien oder Perowskiten wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. So ist es mittlerweile möglich, Solarmodule beider Materialklassen mit Effizienzen von deutlich über 10% herzustellen. Ein essentieller Schritt für die Übertragung der entsprechenden Prozesse auf Rolle-zu-Rolle-Fertigung von PV ist aber eine geeignete in-line Qualitätskontrolle.

Hier setzt das ZIM-Projekt PIASOL an, bei dem in Kooperation mit der Automatic Research GmbH (AR) ein Messgerät entwickelt wird, welches es ermöglicht den PV-Film innerhalb der Fertigungsstraße zu testen. Dabei wird das Prinzip der photoinduzierten Absorption verwendet, welches Rückschlüsse auf die Ladungsträgerdynamik innerhalb der gedruckten Schicht ermöglicht. Die sogenannte Pump-Probe-Spektroskopie (Abbildung 8) ist dabei nichts neues, war jedoch bislang aufgrund des hohen Preises und der geringen Messgeschwindigkeit auf das Labor beschränkt. Der von uns entwickelte Messalgorithmus sowie eine spezielle Lasermodulation macht die Messdaten in wenigen Mikrosekunden zugänglich, wodurch eine Überwachung des Rolle-zu-Rolle-Produktionsprozesses in Echtzeit möglich wird. Durch die Verwendung preiswerter Komponenten, wie bspw. von Laserdioden, bleiben die Kosten der Apparatur in dem für in-line Qualitätskontrolle akzeptablen Rahmen. Zunächst wird dieses Prinzip an einem Testaufbau am Energie Campus Nürnberg sowohl für organische als auch für Perowskit-basierte Aktivschichten optimiert und durch den Projektpartner AR in eine kompakte Inline-Lösung gewandelt.

Abbildung 9 zeigt eine typische Messung an einem P3HT:PCBM-Film. Die Anregungslaserdiode wird mit einer Frequenz von 1500 Hz an- und ausgeschaltet. Die dadurch verursachte Änderung der Transmission der Probe im Bereich von  $\Delta T/T = 10^{-4}$  wird mit einem kinetischen Modell für die Erzeugung und Rekombination der Ladungsträger angepasst. Aus dieser Anpassung ergeben sich direkt die für die Leistung einer Solarzelle relevanten Parameter wie die Quanteneffizienz der Ladungsträgererzeugung oder die Ladungsträgerlebensdauern.

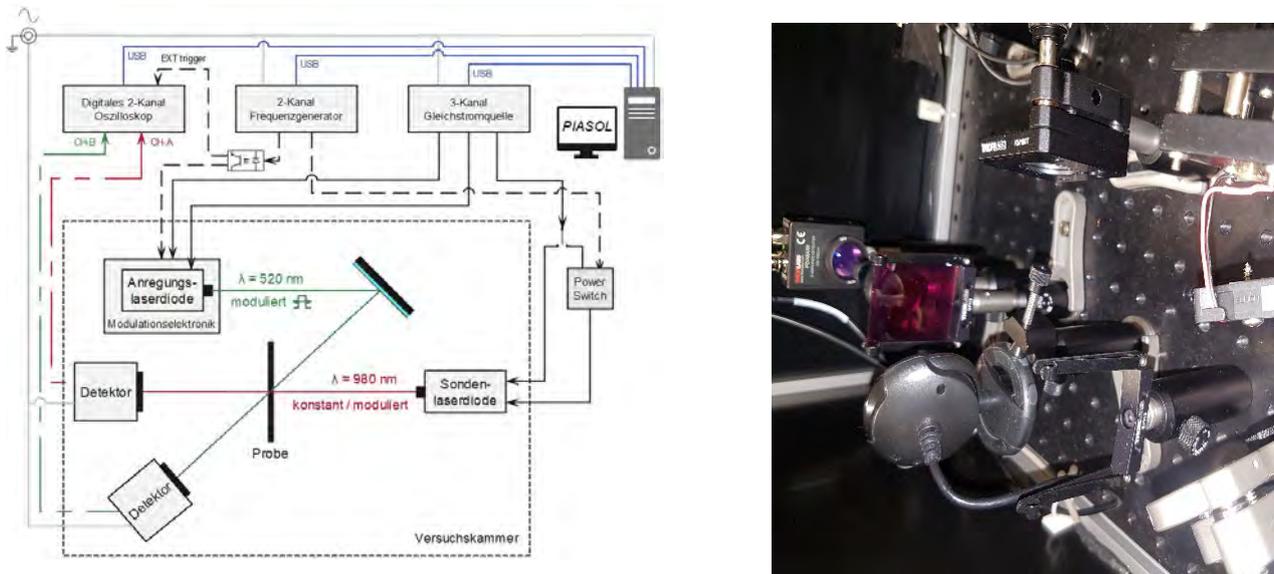


Abbildung 8: Apparatur zur Messung der photoinduzierten Absorption in Aktivschichten für die gedruckte Photovoltaik. Links: schematisch. Rechts: experimenteller Aufbau. Der Puls einer Anregungslaserdiode erzeugt in der Probe eine zeitliche Änderung der Absorption, die von der Sondenlaserdiode registriert und auf dem Oszilloskop dargestellt wird.

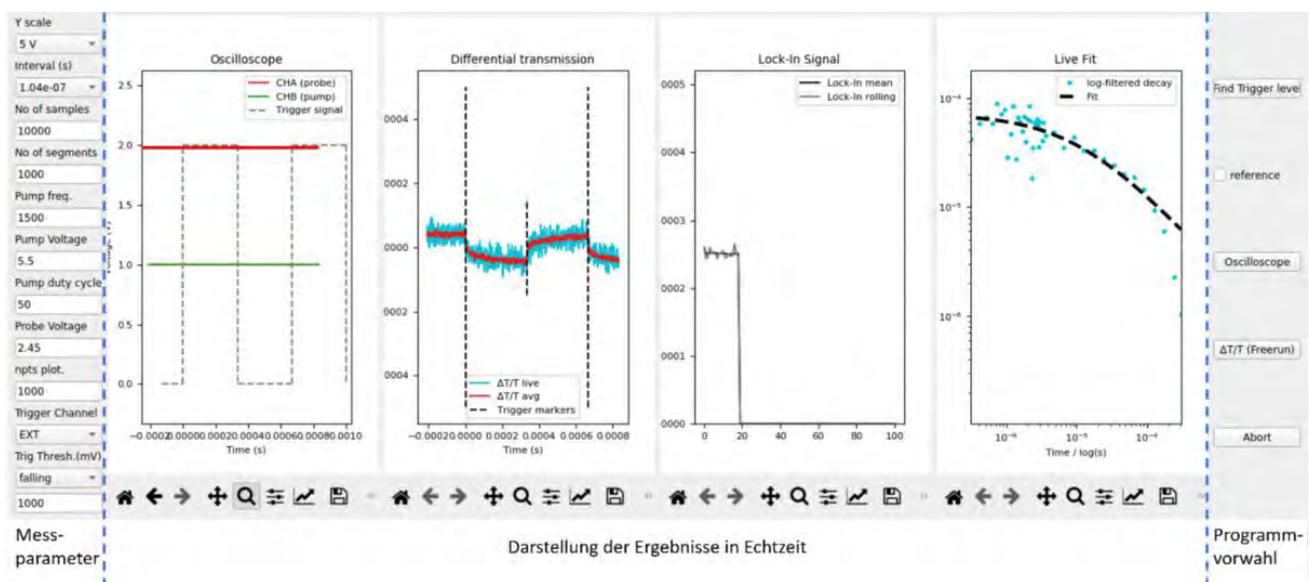


Abbildung 9: Darstellung der Ergebnisse einer photoinduzierten Absorptionsmessung an einem P3HT:PCBM-Film in Echtzeit. Die auf der Erzeugung von Ladungsträgern beruhende differentielle Transmissionsänderung wird mit einem kinetischen Modell der Ladungsträgererzeugung und -rekombination angepasst. Aus der Anpassung werden Konzentration und Lebensdauer der photoinduzierten Ladungsträger bestimmt, woraus sich direkt auf die Qualität des Films zurückschließen lässt.

### 1.3 Kooperationen

Im Rahmen des EET-Teilprojekts 1 wurden zahlreiche Projekte mit akademischen und industriellen Partnern durchgeführt. Laufende Kooperationen bestehen (über das Institut für Materialien der Elektrotechnik und der

Energetechnologie der FAU) mit den Industriepartnern Armor Solar Power Films GmbH (direkt finanziertes Projekt zur Aufskalierung von Perowskit-PV), der EnCN-Ausgründung Automatic Research GmbH (ZIM-Projekt „PIASOL“), HeiQ RAS AG und Enerthing GmbH (ZIM-Projekt „OPV4IoT“), acp GmbH (ZIM-Projekt „PVCO2“) sowie mit der EnCN-Ausgründung, der Sciprios GmbH (ZIM-Projekte „PV-IL“ und „PVCO2“).

#### 1.4 Ausblick

Die Forschungsergebnisse der vergangenen fünf Jahre haben die gedruckte Photovoltaik zu einer Technologie gemacht, die in Nischenbereichen bereits erfolgreich von verschiedenen Firmen kommerzialisiert wird. Weitere Anstrengungen sind nötig, um zusätzliche Anwendungsfelder zu erschließen. Materialien, Bauteilarchitekturen und v.a. Prozesse werden hierzu in den o.g. Projekten weiterentwickelt. Hier sind insbesondere zu nennen:

- die Entwicklung von Prozessen und Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlagen für die Fertigung von Perowskit-basierten PV-Modulen mit der Fa. Armor SPF
- die Entwicklung von mehrfarbigen OPV-Modulen mittels Tintenstrahldruck mit der Fa. Metawell GmbH
- die Optimierung von Laserstrukturierungsprozessen mit der Fa. Sciprios
- die Entwicklung gedruckter OPV-Module mit Silbernanodraht-Elektroden für „light harvesting“ zur Energieversorgung von IoT-Geräten mit den Firmen HeiQ RAS AG und Enerthing GmbH

Darüber hinaus werden Hochdurchsatzmethoden entwickelt, mit denen die o.g. Entwicklungen erheblich beschleunigt werden können. Dies erfolgt durch Modifizierung der Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage, so dass verschiedene Materialkompositionen nicht mehr nur sequentiell, sondern hochparallelisiert aufgetragen und charakterisiert werden können.

## 2 Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse

### 2.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg  
Leitung: Dr. Thomas Heumüller

### 2.2 Bildgebende Defektanalyse

Im Rahmen des EET Projekts werden völlig neue Beschichtungsverfahren entwickelt, mit denen fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld realisiert wird. Mit hochaufgelöster Photolumineszenz (PL) und Elektrolumineszenz (EL) wurde eine erfolgreiche Qualitätskontrolle umgesetzt, die auch bei der Entwicklung von Modulen aus TP1 zum Einsatz kommt (Abbildung 10). Während großflächige Defekte wie fehlerhafte Schichtdicke oder Materialzusammensetzung in PL erkannt werden und Kontaktprobleme im EL-Bild sichtbar sind, konnten insbesondere Kurzschlüsse an kleinsten Defekten mit hochsensitiver Thermographie detektiert werden. Ein lokaler Wärmeeintrag durch Stromfluss an einem Defekt breitet sich lateral aus, wodurch auch Defekte unterhalb der Auflösungsgrenze aufgrund ihrer thermischen Signatur erkannt werden können. Hierbei wird das sogenannte Lock-In Verfahren zur Auflösung zeitlicher Temperaturunterschiede im mK-Bereich angewendet.

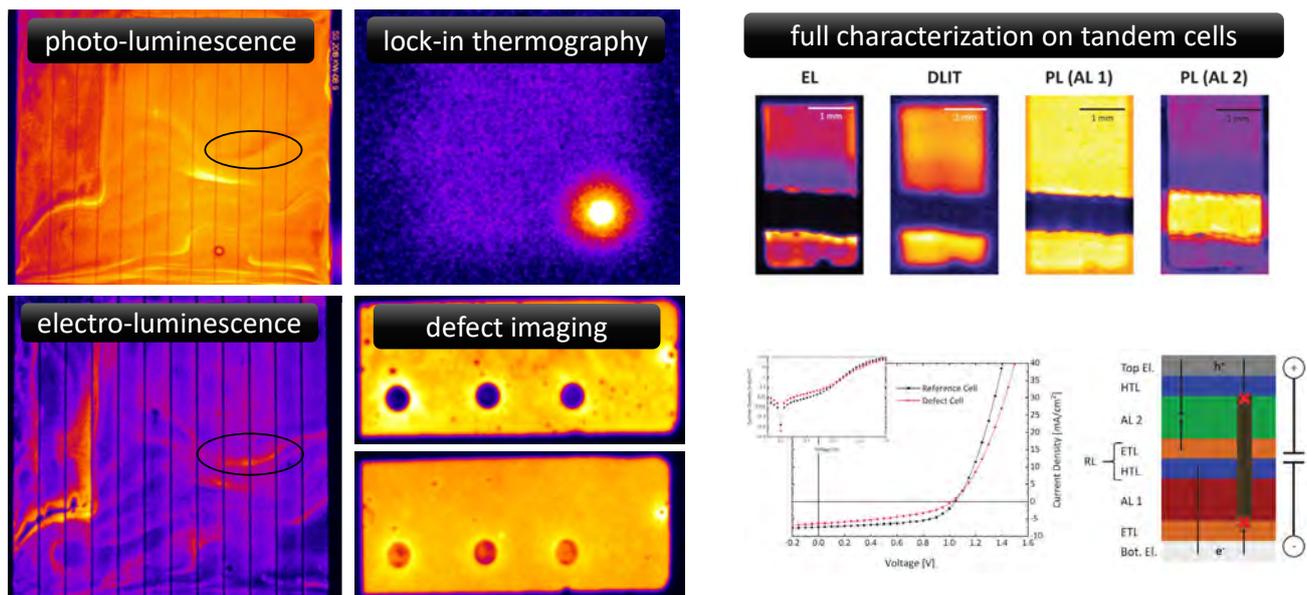


Abbildung 10: Photolumineszenz (PL)- und Elektrolumineszenz (EL)-Bilder zur Qualitätskontrolle eines OPV-Moduls. Hochsensitive Thermographie ermöglicht die Identifizierung kleinster Defekte. Mitte: Solarzellen mit gezielt erzeugten Defekten als Referenzmessungen zur Charakterisierung von Defekten. Rechts: Die während der Projektlaufzeit entwickelten Tools kommen bei der vollständigen Charakterisierung komplexer Tandem-Solarzellarchitekturen zum Einsatz.

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 kann zwischen Degradationseffekten in der aktiven Schicht und Degradation durch Interface Materialien unterschieden werden. Die Kombination der dadurch gesammelten Erfahrungen und Tools ermöglicht die vollständige Defektanalyse selbst an komplexen Tandem Solarzellarchitekturen bei denen z.B. mit PL Lasern unterschiedlicher Wellenlänge selektiv einzelne Schichten angeregt und charakterisiert werden können.

### 2.3 Spektrale Analyse zur Vorhersage von Effizienz und Stabilität

Mit der erfolgreichen Entwicklung und Umsetzung von Methoden zur Qualitätskontrolle und detaillierten Analyse von Schichten in neuartigen Druckprozessen, rückt eine Optimierung der Schichtzusammensetzung durch neuartige Tintenformulierungen in den Vordergrund. Aus diesen Gründen wurden Methoden entwickelt, um mit Hilfe des innerhalb des EnCN erworbenen Know-hows die Tintenformulierung im Hinblick auf Effizienz und Stabilität zu optimieren. Für die Komposition von Tintenformulierungen für organische Solarzellen stehen verschiedenste Komponenten an organischen Halbleitern sowie Additiven zur Verfügung, die in unzähligen Verhältnissen gemischt werden können. Eine manuelle Optimierung, bei der ganze Bauteile hergestellt werden, ist damit vom experimentellen Umfang her nicht möglich. Neben roboterbasierten Hochdurchsatzmethoden zur Filmherstellung mit Dropcasting, mit denen bis zu 1000 Filme unterschiedlicher Zusammensetzung an einem Tag getestet werden können, wurden insbesondere auch Methoden des maschinellen Lernens zur Optimierung komplexer Systeme eingesetzt. Dadurch ist eine erhebliche Reduzierung des experimentellen Aufwands sowie der Menge an benötigtem Material im Vergleich zu konventionellen Methoden erreicht worden.

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 (Abbildung 11). Zum Beispiel kann die relative Photolumineszenz der Mischung verglichen zur Photolumineszenz der Einzelkomponenten (d.h. die PL-Löschung) direkte Aussagen über die Eignung der Mischung zur Generation freier Ladungsträger ermöglichen. Weitere Informationen wie der PL-Verlust unter verschiedenen Stressfaktoren wie Hitze oder UV-Licht ermöglichen Aussagen über die morphologische und chemische Stabilität der Mischung. 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 Morphologie bestimmt, sondern durch das Verhältnis der Exzitonlebensdauer im Akzeptor-Reinmaterial im Vergleich zur Exzitonlebensdauer in der Donor-Akzeptor Mischung. 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 effektiv ermittelt werden.

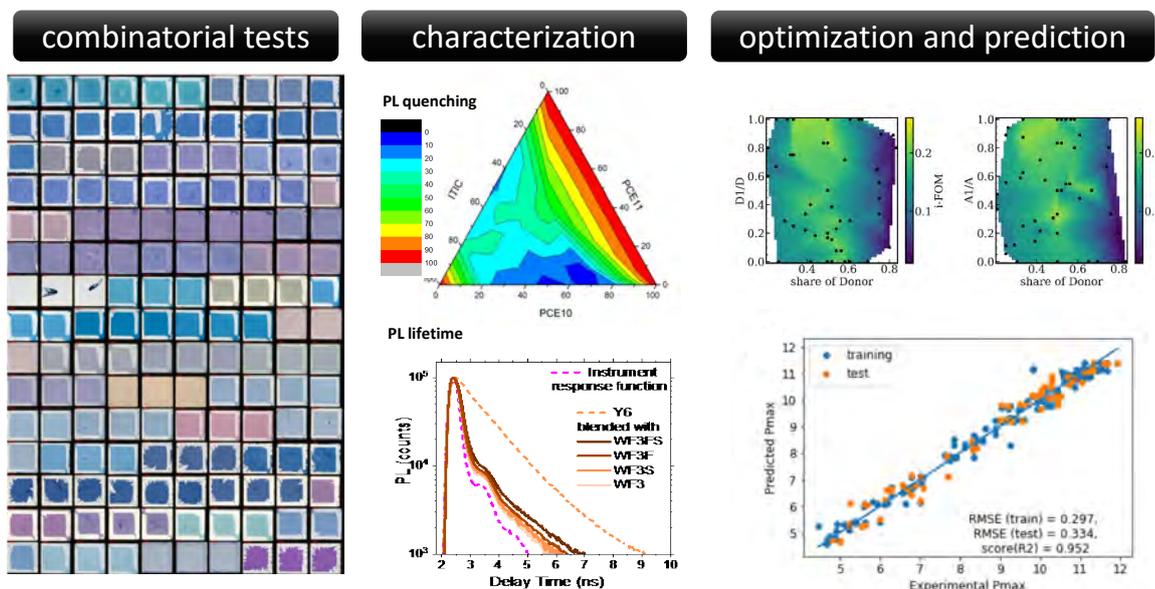


Abbildung 11: Hochdurchsatz-Filmherstellung zur Optimierung von Tintenformulierungen. Die Charakterisierung mittels Photolumineszenz-Messungen kann das Potential neuer Materialmischungen zur Erzeugung freier Ladungsträger evaluieren. Maschinelles Lernen basierend auf der spektralen Analyse von Photolumineszenz- und Absorptionsmessungen erlaubt die Vorhersage von Bauteileffizienz und Lebensdauer.

Darüber hinaus ist es durch den Einsatz von maschinellem Lernen gelungen, Bauteilkenngößen und sogar Stabilität von organischen Solarzellen vorherzusagen. 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. Die hierdurch gewonnenen Daten fließen in die Entwicklung eines digitalen Zwillings ein. Anhand einer stetig wachsenden Datenbank mit Prozessparametern, aktiver Schicht Zusammensetzung, lichtintensitätsabhängiger IV, sowie Absorptions- und Photolumineszenz Daten können Einsichten über physikalische Zusammenhänge gewonnen werden und für neue Materialien die Vorhersagen stetig verbessert werden. Für eine voll automatisierte Datenerfassung und Speicherung wurde ein digitales Laborbuch nach den FAIR-Prinzipien umgesetzt, das die in voll automatisierten PL- und Absorptions- Messplätzen erfassten Daten direkt zuordnet und den strukturierten Datenbankimport ermöglicht.

## 2.4 Ausblick

Die in TP2 entwickelten Charakterisierungsmethoden zur zerstörungsfreien Analyse können effizient in der Herstellung von organischen Solarzellen zur Inline-Kontrolle eingesetzt werden. Über den unmittelbaren Mehrwert in der Qualitätskontrolle durch bildgebende PL-Verfahren, Absorption, Elektrolumineszenz und Thermographie ist insbesondere der Aufbau einer Datenbank mit den gesammelten Messdaten verschiedenster Materialsysteme und Prozessbedingungen von unschätzbarem Wert. Unter Verwendung von Tools zur Analyse von Big Data können in der Zukunft Muster in den Daten gefunden werden, die nicht nur bei der Qualitätskontrolle und Optimierung helfen, sondern grundlegende physikalische Zusammenhänge in Bezug auf Effizienz und Stabilität erkennen lassen.

## 3 Smarte und schaltbare Fenster

### 3.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Wolfgang Heiss

### 3.2 Arbeiten und Ergebnisse

Smarte und schaltbare Fenster sollen helfen, über die Reduktion der Stromkosten für Klimatisierung und Beleuchtung den Energiebedarf von Tags über benutzten Gebäuden zu senken. Die Transmission der smarten Fenster soll dabei nicht nur für sichtbares Licht eingestellt werden können, sondern auch für Wärmestrahlung, die der Sonnenstrahlung im infraroten Spektralbereich gleich zu setzen ist. Die elektrochromen Effekte sollen dabei mit Hilfe von lösungsbasierten Verfahren erzielt werden, sodass die demonstrierten Bauteile auch skaliert und mit den am EnCN verfügbaren Druckmaschinen hergestellt werden können. Dabei besteht die Möglichkeit Materialien zu entwickeln, die mit einer Elektrode beide Spektralbereiche selektiv schalten kann, oder auch zwei elektrochrome Elektroden zu benutzen, die komplementäre Spektralbereiche schalten können. Im Gegensatz zu dem Antrag haben wir uns entschieden, eher dem zweiten Weg zu verfolgen und somit elektrochrome Bauteile zunächst getrennt für den sichtbaren und den infraroten Bereich zu entwickeln.

#### 3.2.1 Elektrochrome Bauteile für den infraroten Spektralbereich

Am Anfang des Projektes hatten wir uns damit beschäftigt, als Standardmaterial für den infraroten Spektralbereich Indium-Zinn-Oxid als nanoporöse Schichten mit Hilfe von galvanischen Abscheidemethoden herzustellen, weil dies Methode für andere Metalloxide auch industriell angewendet und elektrochrome Fenster damit produziert werden. Wir haben diese Methode aber im Laufe des Projektes verworfen und uns ganz auf die Entwicklung von nanokristallinen Tinten konzentriert, die mit Niedertemperatur-Druckmethoden aufgebracht und auch mit den am ENCN verfügbaren Anlagen großenskaliert verarbeitet werden können. Dabei ist das Ziel diese Bauteile auf Folien zu drucken, welche dann auf Fenster appliziert werden. Die elektrochromen Bauteile oder schaltbaren Fenster bestehen aus zwei Substraten, auf denen zwei transparente Elektroden abgeschieden sind. Zwischen den Elektroden befindet sich Elektrolyt, der Lithium Ionen enthält, welche sich je nach angelegter Spannung an die nanoporöse Elektrodenoberfläche anlegen oder sich davon entfernen und dabei die Konzentration der Elektronen in den Elektroden verändern. Hohe Elektronenkonzentrationen verursachen hohe Absorption im Infraroten aufgrund von „Plasmonen“, während Elektroden mit geringe Elektronenkonzentrationen auch im infraroten Spektralbereich transparent werden. Zu Beginn wurde von uns ein flüssiger Elektrolyt verwendet, um diese Effekte zu demonstrieren, jetzt verwenden wir aber natürlich dazu feste Elektrolyte, die nicht nur die notwendigen Lithium Ionen enthalten, sondern auch als Kleber dienen, mit denen die beiden Elektroden der Bauteile fest miteinander verbunden werden. Auch wenn die dazu verwendeten Polymere im Infraroten charakteristische Absorptionslinien aufweisen, sind diese Schichten dünn genug, um die gewünschten infrarot optischen Eigenschaften der Bauelemente nicht zu sehr zu beeinflussen. Schlüssel zu den gewünschten Filmen aus Indium-Zinn-Oxid Nanokristallen war eine Behandlung der abgeschiedenen Schichten mit einem querverbindenden Liganden. Dieser Ligand, Ethandithiol, wurde in der Literatur für zahlreiche andere nanokristalline Bauteile eingesetzt, aber noch nie für Indium-Zinn-Oxid Nanokristallschichten. Die Filme zeigten nach der Behandlung mit dem Querverbinder eine nanokristalline Oberflächenstruktur (Abbildung 12b) und auch eine Oberflächenrauheit, die sich im Vergleich zu anderen Behandlungen als günstig erwiesen hat. Die Indium-Zinn-Nanokristalle wurden so synthetisiert, dass sie die gewünschten Plasmonenresonanzen aufweisen, um im infraroten Spektralbereich stark zu absorbieren. Während die Nanokristalllösung in Abbildung 12c eine Resonanz bei  $\sim 1700$  nm aufweist, verschiebt sich diese im Film zu noch längeren Wellenlängen. Im Detail hängt die Wellenlänge der Resonanz von der Nachbehandlung des Films ab. Dabei werden die Liganden der Nanokristalle aus Myristinsäure (MS) gegen andere organische Gruppen wie Ameisensäure (AS) oder eben dem Ethandithiol (EDT) Querverbinder ersetzt. Wichtig ist dabei, dass Elektroden aus diesen Nanokristallschichten in

elektrochromen Bauteilen die gewünschten schaltbaren Eigenschaften aufweisen. Zwischen 1600 nm und 2200 nm Wellenlänge treten dabei die größten Effekte auf. Durch Anlegen einer Spannung zwischen +4 und -4V erhöht sich die optische Dichte von 0,4 auf 1,2, d.h., auf den dreifachen Wert.

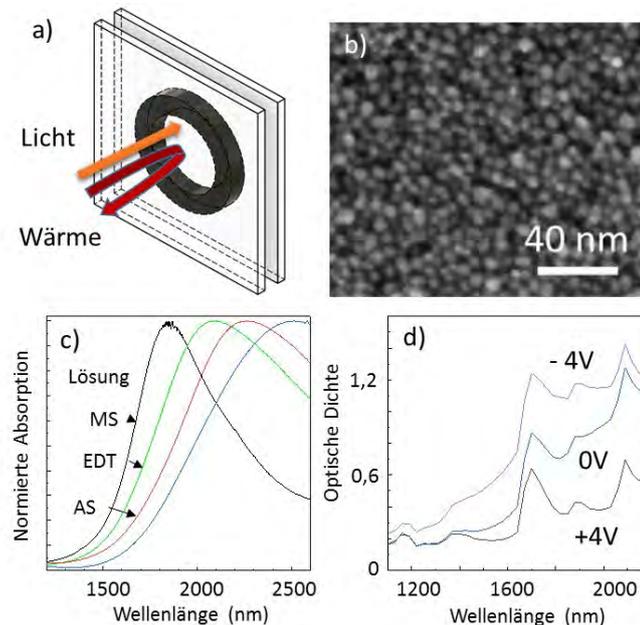


Abbildung 12: Elektrochromes Bauteil das im infraroten Spektralbereich arbeitet. a) Schematischer Aufbau des Bauteils. b) elektronenmikroskopische Aufnahme der nanokristallinen Oberfläche nach der Behandlung mit einem Querverbinder. c) optische Eigenschaften der Indium-Zinn-Oxid Nanokristall Lösung und der Filme die daraus mit unterschiedlichen Oberflächenliganden (MS, EDT, AS) hergestellt worden sind. d) Elektrochromes Schalten der optischen Dichte des Bauteils durch Anlegen einer Spannung.

Auch wenn elektrochrome Elektroden mit unterschiedlichen Schaltstufen im sichtbaren und im infraroten Spektralbereich mit Indium-Zinn-Oxid Nanokristallen erzielt werden können, ist dieses Material keine geeignete Lösung um damit Fenster großtechnisch auszustatten. Grund dafür ist, dass Indium-Zinn-Oxid in der Elektronik sehr häufig als transparente Elektrode eingesetzt wird, z. B. in Flüssigkristallbildschirmen, in organischen Leuchtdioden, oder auch in Dünnschicht-Solarzellen, und dabei das gesamte Weltvorkommen an Indium verbraucht. Indium ist ein seltener und deshalb auch sehr teurer Rohstoff, so dass an den großflächigen Einsatz dieses Materials als Sonnenschutz in Gebäuden nicht zu denken ist. Wir haben deshalb eine Alternative gesucht und als Ersatz Antimon dotiertes Zinn Oxid gewählt. Antimon zählt auch zu den seltenen Metallen, aber aufgrund der geringeren Nutzung und deshalb Nachfrage ist Antimon als Rohstoff mindestens zwanzigfach billiger als Indium. Zur Herstellung der Nanokristalle aus diesem Material wurde eine in der Literatur beschriebene hydrothermale Synthese adaptiert. Die Synthese wird dabei in deionisiertem Wasser durchgeführt und ist auch für größere Mengen einfach skalierbar. Nach der Synthese werden die Nanokristalle mit einem organischen Surfactanten funktionalisiert, so dass diese in organischen Lösungsmitteln eine stabile kolloidale Lösung ergeben. Die Antimondotierten Zinn-Oxid Nanoteilchen haben in transmissionselektronischen Aufnahmen etwas unregelmäßige Formen und Größen von ca. 6 nm, weshalb sie in Lösung stabil sind und Licht im sichtbaren Spektralbereich nur wenig streuen. Die konzentrierten kolloidalen Lösungen sind mit Ausnahme des reinen Zinn-Oxid Referenzmaterials stark blau gefärbt, wobei die Farbe mit zunehmender Konzentration des Antimons, von 0% bis 20% deutlich dunkler wird. Im Infraroten zeigen sich die gewünschten Plasmonenresonanzen, die sich mit zunehmendem Antimongehalt von langen Wellenlängen bis zu einer Wellenlänge von 2 Mikrometer verschieben lassen. Diese lokalisierten Plasmonenresonanzen, die in Abbildung 13 in dünnen Filmen gemessen worden sind, sind somit bei einer sehr ähnlichen Wellenlänge zu finden wie in den Indium Zinn Oxid Nanokristallen, die wir letztlich in den elektrochromen Bauteilen für das Infrarote ersetzen möchten.

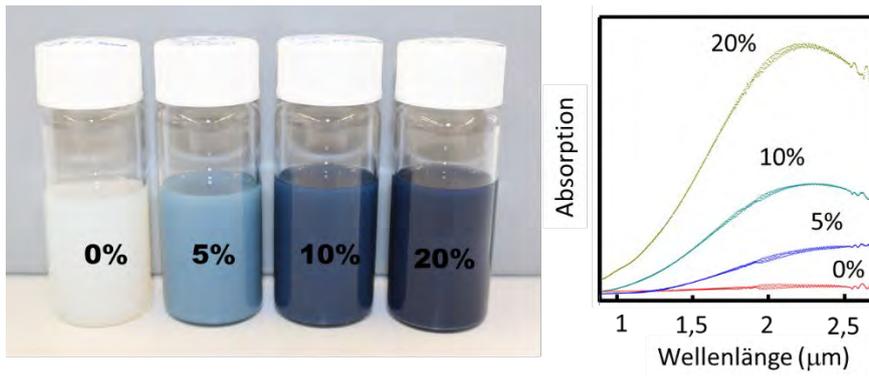


Abbildung 13: Kolloidale Lösungen aus Antimon-dotierten Zinnoxid-Nanokristallen mit unterschiedlicher Dotierkonzentration. Abhängig von der Dotierkonzentration zeigen diese Nanokristalle in dünnen Filmen plasmonische Absorptionsmaxima im infraroten Spektralbereich.

Aus diesen Nanokristall-Dispersionen in organischen Lösungsmitteln sollen in einem ersten Schritt in Richtung Bauteil leitfähige Elektroden erzeugt werden. Dazu müssen die elektrisch isolierenden langkettigen organischen Liganden entweder nach der Abscheidung entfernt, oder bereits in der Lösung gegen kurz-kettige Liganden ersetzt werden. Für diese Schritte wurden von uns sowohl unterschiedliche Säuren als auch Metall-Halogenid Komplexe oder Tetrafluorborat als Liganden verwendet. All diese Substanzen erlaubten einen erfolgreichen Austausch der an der Oberfläche haftenden Amin-Oleate in Lösung (Abbildung 14). Abhängig vom verwendeten Liganden änderte sich dabei die Farbe der kolloidalen Lösungen, wobei die Plasmonenresonanz-Maxima im Infraroten aber nahezu bei gleicher Wellenlänge bleiben. Eine Besonderheit stellt hier Antimonchlorid als Ligand dar, da dieser Ligand an der Oberfläche angebracht die Plasmonenresonanz etwas in Richtung Blau verschiebt. Obwohl es mehrere Parameter gibt, die eine Blauverschiebung der Plasmonenresonanz erklären könnten, gehen wir davon aus, dass sich durch diese Liganden die Ladungsträgerkonzentration in den Nanokristallen weiter erhöht. Ob dabei weiteres Antimon in die Nanokristalle eindringt oder nur Ladungen an der Oberfläche abgegeben werden, kann aufgrund der kleinen Größe der Nanokristalle nicht beantwortet werden. Günstig ist aber zumindest, dass die Plasmonenresonanzen der Antimon-dotierten Zinnoxid-Nanokristalle noch näher an die Resonanzen von ITO-Nanokristallen herankommen, welche ja ersetzt werden sollen.

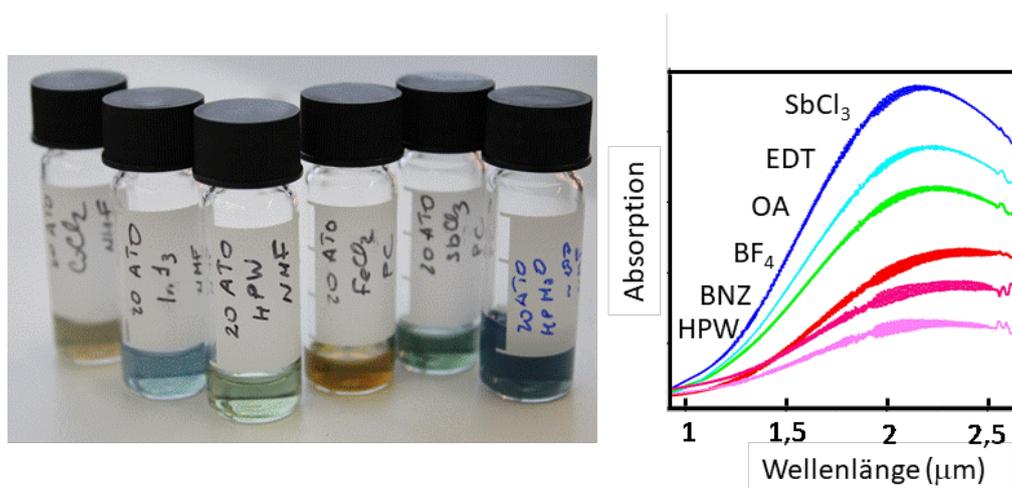


Abbildung 14: Lösungen von Antimon-dotierten Nanokristallen, funktionalisiert über verschiedene Liganden. Während sich die Farbe der Lösungen ändert, bleiben die Plasmonenresonanz-Maxima bei nahezu gleichen Wellenlängen, für  $\text{SbCl}_3$ -Liganden liegen sie bei der kürzesten Wellenlänge.

Die leicht grün gefärbte Lösung der Antimon-dotierten Zinnoxid-Nanokristalle erscheint als abgeschiedener Film nahezu vollkommen transparent im Sichtbaren (Abbildung 15), ist im Infraroten aber semitransparent. In einem Bauteil mit einem festen Polymer-Elektrolyten und einer planaren Gegenelektrode kann die Transparenz dann sowohl erhöht als auch erniedrigt werden. Die erreichte Hell-Dunkel Modulation ist mit dem Antimon-dotierten Zinnoxid dabei ähnlich effizient wie die von elektrochromen Bauteilen, die aus ITO-Nanokristallen hergestellt worden sind, weshalb in Zukunft auf den Einsatz von ITO als elektrochromem Material verzichtet werden kann, was in Bezug auf eine möglichen Kommerzialisierung der elektrochromen Bauteile als wesentlicher Schritt angesehen werden kann.

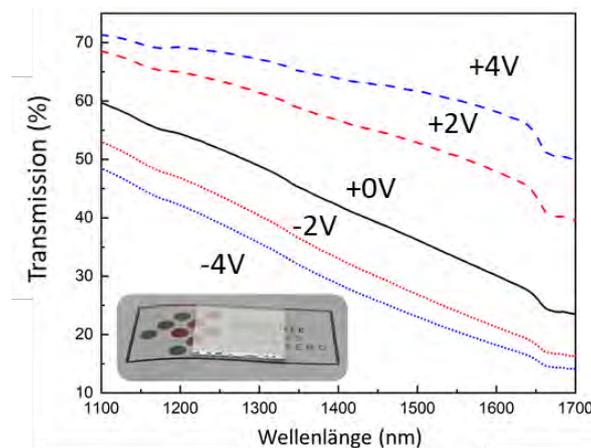


Abbildung 15: Schaltverhalten von Antimon-dotierten Nanokristall-Bauteilen mit unterschiedlichen angelegten Spannungen.

### 3.2.2 Elektrochrome Bauteile für den sichtbaren Spektralbereich

Auch für den sichtbaren Spektralbereich hatten wir zu Beginn des Projektes zunächst erste Erfahrungen mit Elektroden gemacht, die durch galvanische Abscheidung hergestellt worden sind. Als erstes Material wurde dazu ein seit langem bekanntes Pigment gewählt, das für sein elektrochromes Verhalten bekannt ist – Preußisch Blau. Während sich diese Elektroden sehr gut als Trainingselemente geeignet hatten, war das Ziel auch für den sichtbaren Spektralbereich druckbare Tinteln herzustellen, mit denen größenskalierbare elektrochrome Folien bedruckt werden können. Dazu haben wir eine neue Synthese von Nanopartikel-Lösungen aus Preußisch-Blau entwickelt, die mit einem automatisierten Robotersystem optimiert worden ist. Die Synthese wurde in Ethylenglykol über die Reaktion von zwei einfachen, eisenhaltigen Reaktanten durchgeführt. Mit einem Pipetten-Roboter der am HI-ERN (Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy) betrieben wird, wurden die Nanokristall-Tinten (Insert in Abbildung 16) in mehreren Schritten, vor allem in Bezug auf ihre Stabilität optimiert. Während zunächst alle verwendeten Verhältnisse zwischen den Reaktanten tiefblau gefärbte kolloidale Nanokristall-Dispersionen ergeben haben, konnte nach einer Lagerzeit von 8 Wochen ein klarer Unterschied zwischen den Tinten festgestellt werden. In weiterer Folge wurden nur langzeitstabile Tinten weiterverarbeitet. Es sollte festgestellt werden, dass die in der Literatur angegebenen Rezepte für die Tintenformulierung ausschließlich Tinten hervorbringen, die nach kurzer Zeit aggregieren. Diese Aggregate sind vor allem für die Herstellung von homogenen dünnen Filmen ungeeignet. Die erzielte Filmqualität hängt nicht nur von der Qualität der Tinten ab, sondern auch von dem Abscheidungsprozess. Für unsere Bauteile wurde aufgeschleudert, wobei dieser Prozess mit einem weiteren automatisierten Aufbau des HI-ERN Institutes (eines Spinbots, Abbildung 16(a)) optimiert wurde. Dazu wurden die Nanopartikel in eine wässrige Lösung eingebracht. Getestet wurden dabei unterschiedliche Parameter für den Spinbot, unterschiedliche Nanopartikelkonzentrationen, verschiedene Additive (Benetzungsmittel und weitere Lösungsmittel) in den Dispersionen. Die Evaluierung der Schichthomogenität erfolgte sowohl über automatisierte Absorptionmessungen 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 daraufgelegt, 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, als auch einen Elektrolyten. Der Elektrolyt wurde von uns in Bezug auf seine Klebeeigenschaften modifiziert, wobei hier ein Kompromiss zwischen Transparenz und Klebekraft gefunden werden musste. Für die Gegenelektrode wurden auch Li-speichernde Metalloxid-Nanokristalle synthetisiert und als Film abgeschieden. Die kompletten elektrochromen Bauteile aus dem Preußisch-Blau (Abbildung 16(b)) zeigen eine hohe Modulationsfähigkeit der optischen Transmission zwischen 70% und ca. 10% und einen Farbumschlag zwischen transparent und blau gefärbt. Fotos durch solche Bauteile sind im Insert in Abbildung 16(b) gezeigt.

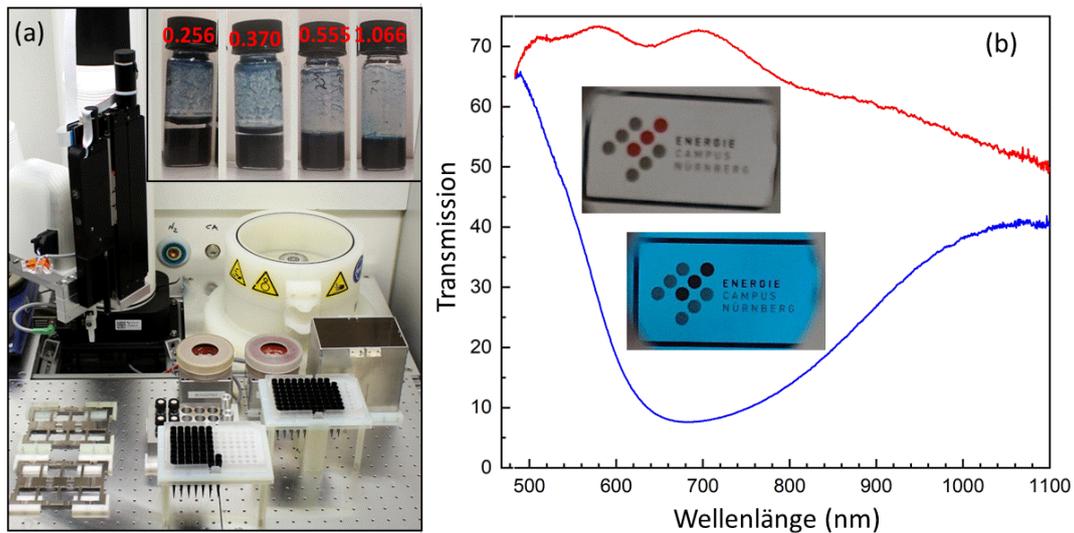


Abbildung 16: (a) Aufbau für das automatisierte Aufschleudern von funktionalen Tinten für die Roboter unterstützte Optimierung von dünnen Filmen. Inset: Nanokristalline Tinten aus Preußenblau nach einer Lagerzeit von 8 Wochen. Abhängig von der Zusammensetzung ergeben sich unterschiedliche Stabilitäten, die über die Präzipitation der Nanopartikel in der Dispersion beobachtet werden kann. (b) Transmission der elektrochromen Bauteile im transparenten und gediminten Zustand. Inset: Fotos des ENCN Logos durch ein elektrochromes Bauteil unter verschiedenen Schaltstufen.

Während unsere Untersuchungen von Metalloxid-Nanokristallen für den infraroten Spektralbereich Antimon-dotiertes Zinnoxid als sehr vielversprechendes Material identifiziert haben, sind Metalloxide auch für den sichtbaren Spektralbereich eine gute Wahl. Zwei dieser möglichen Systeme haben wir näher untersucht. Einerseits wurden Wolframoxid ( $\text{WO}_{3-x}$ )-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 Filmziehgerät aufgebracht werden kann und dabei ausreichend dicke Filme ergibt, um in einer elektrochemischen Halbzelle unter Anlegung eines Potentials eine tiefe Blaufärbung zu liefern (Abbildung 17(a)). Der größte elektrochrome Effekt wird dabei im infraroten Spektralbereich zwischen 1000 und 1700 nm erzielt. Das zweite Material, das synthetisiert und skaliert wurde ist  $\text{VO}_x$ .  $\text{VO}_x$  ergibt eine passende Gegenelektrode zum  $\text{WO}_{3-x}$  und die Färbung kann zwischen gelb (Abbildung 17(b)) und transparent verändert werden. Kombiniert man nun Elektroden aus diesen beiden Metalloxid-Nanokristall-Materialien in einem elektrochromen Bauteil, so ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Färbung des Bauteils zwischen Grün und Transparent zu verändern (Abbildung 17(c)). Wichtig für uns ist, dass man zwei elektrochrome Elektroden miteinander kombinieren kann, und damit den schaltbaren Spektralbereich erweitert. Im Besonderen wäre von uns das unabhängige Schalten von infrarotem und sichtbarem Licht gefordert, was die Wahl der verwendbaren elektrochromen Materialien im Sichtbaren einschränkt.  $\text{WO}_{3-x}$  kommt hier nicht in Frage,  $\text{VO}_x$  und Preußisch Blau aber schon.

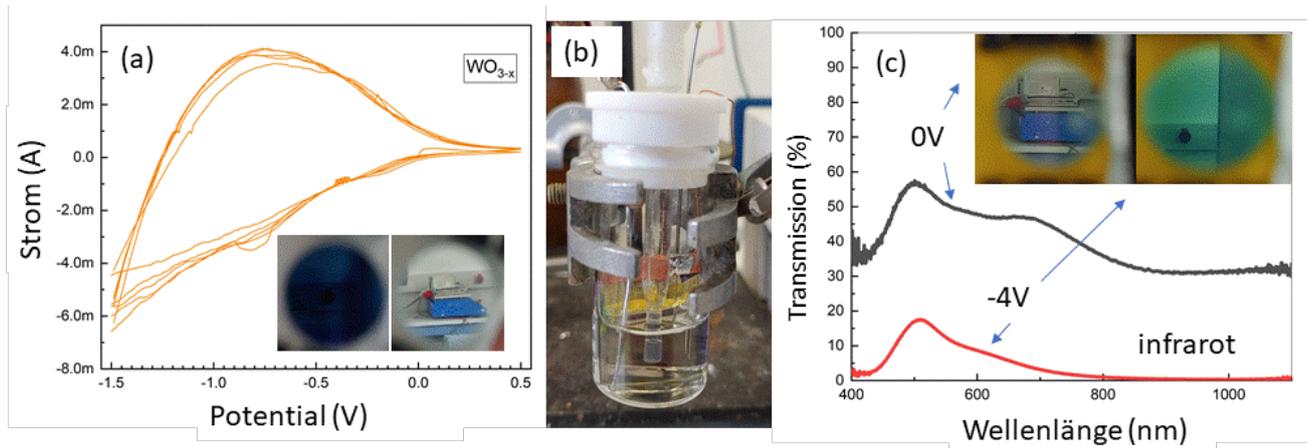


Abbildung 17: (a) Zyklische Voltammetrie Messkurven an einer  $WO_{3-x}$  Nanokristall-Elektrode, die bei negativen angelegten Potentialen stark blau gefärbt ist und bei Nullpotential transparent. Das Insert zeigt den Blick durch ein elektrochromes Bauteil mit  $WO_{3-x}$  Nanokristallelektroden im gefärbten 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 Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen dieses Projektteiles wurde ein Konsortium zusammengestellt, das einen Antrag für ein EXIST Gründerstipendium erarbeitet hat. Dieser Antrag wurde kürzlich abgelehnt, allerdings mit Kommentaren die uns zuversichtlich machen, dass die aufgezeigten Kritikpunkte in nächster Zeit behoben werden können. Insbesondere werden wir deshalb an der Größenskalierung der elektrochromen Gläser und Folien arbeiten. Zu den elektrochromen Bauteilen ist auch ein Patent in Ausarbeitung, das für eine Förderung über ein Gründerstipendium unerlässlich ist.

## 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

Gebäude sind für 40 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs und einen damit verbundenen erheblichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß verantwortlich [7 und darin zitierte Referenzen]. Die Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) kann einen Beitrag dazu leisten, Gebäude von Energieverbrauchern in Energieerzeuger zu verwandeln. Alleine auf EU-Ebene liegt das Potenzial von BIPV bei ca. 1000 GW<sub>p</sub>, die jährlich geschätzte 840 TWh Strom liefern können, was 22 % des erwarteten Energiebedarfs der EU-Staaten bis zum Jahr 2030 entspricht. Alleine in Deutschland stehen 1300 km<sup>2</sup> Dach- und 486 km<sup>2</sup> Fassadenfläche für PV-Installationen zur Verfügung, mit einer Gesamtkapazität von einigen Hundert TWh/Jahr. Allerdings hat die weltweit installierte BIPV-Kapazität bis zum Ende des Jahres 2020 erst ca. 9 GW<sub>p</sub> erreicht, bei ca. 770 GW<sub>p</sub> installierter PV-Leistung insgesamt. Die Gründe für den geringen Anteil der BIPV liegen v.a. in den hohen Kosten, der geringen Ästhetik, dem hohen Gewicht und der geringen Anpassungsfähigkeit der verfügbaren Module, v.a. auf Si-Basis, an die bauseitigen Gegebenheiten.

Ziel im Rahmen des Teilprojekts 4 war es daher, in Kooperation mit relevanten Industriepartnern (s. Abschnitt 4.3) auf der Grundlage der Arbeiten in den Teilprojekten 1 - 3 eine preiswerte, attraktive und robuste BIPV-Technologie zu entwickeln, die den urbanen Raum als Energiequelle für die Energiewende erschließt.



Abbildung 18: Erfolgreiche Aufskalierung von Organischer Photovoltaik (OPV) im Rahmen des Projekts EET: basierend auf dem Rolle-zu-Rolle-Druck der Module und ihrer Integrierbarkeit in mannigfaltige BIPV-Anwendungen bietet diese Technologie ein immenses Potential als urbanes Kraftwerk im Rahmen der Energiewende. Die jeweiligen Effizienzwerte der Module sind in % angegeben.

Die Praxistauglichkeit der Organischen Photovoltaik-Module für die Integration in Gebäude-Fassaden wurde in einem gemeinsamen Projekt („know how“) mit den EnCN-Partnern Prof. Dentel und Prof. Kießling sowie den am Projekt beteiligten Firmen Armor Solar Power Films GmbH, Innopark Kitzingen und ACX GmbH an einem Gebäude im Innopark-Kitzingen demonstriert. Dieses Projekt wurde im Jahr 2021 mit der Installation der Fassade erfolgreich abgeschlossen. Abbildung 18 fasst den Projektfortschritt, von der Entwicklung der Produktion bis zur fertigen Fassade, noch einmal graphisch zusammen.

Für den Erfolg der Integration von Photovoltaik in Fassaden sind allerdings nicht nur technische und ästhetische Aspekte entscheidend, sondern auch wirtschaftliche, wenn auch nicht in gleichem Maße wie bei Aufdach- oder Freiland-Anlagen. Es wurde daher im vergangenen Projektjahr eine Studie durchgeführt, die sich mit der Wirtschaftlichkeit der Integration von OPV-Modulen in Fassaden beschäftigte.

#### 4.2.1 Outdoor-Monitoring von OPV-Modulen

Auf dem Dach des ZAE Bayern in Erlangen wurden organische Photovoltaik (OPV)-Module auf P3HT:O-IDTBR-Basis, welche in der Solarfabrik am EnCN entwickelt und im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt wurden, installiert und über ein Jahr hinweg vermessen. Abbildung 19 zeigt, dass die OPV-Module v.a. in den warmen Monaten mit hoher Sonneneinstrahlung gegenüber Silizium-Referenzmodulen einen besseren spezifischen (d.h. pro installiertem Watt-Peak) Energieertrag aufweisen, was insbesondere auf einen besseren Temperaturkoeffizienten zurückzuführen ist. Die unter 45° gegen die Vertikale installierten OPV-Module lieferten einen Jahresertrag von 1,3 kWh/Wp (vgl. m-Si: 1,2 kWh/Wp). Es ist zudem ersichtlich, dass die OPV-Module nicht nennenswert degradiert sind.

Auf Basis dieser Messdaten wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein Simulationsmodell entwickelt, welches den Energieertrag der OPV-Module in Abhängigkeit von Orientierung und Neigung auf Grundlage von Wetterdaten (Einstrahlung und Lufttemperatur) berechnen kann. Für eine senkrechte (Fassaden/Fenster-)Installation ergibt sich eine optimale azimutale Orientierung von -30° (d.h. südwestlich, siehe Abbildung 20). Um zu evaluieren, ob es für einen Hausbesitzer sinnvoll ist eine, zwei, drei oder sogar alle vier Fassadenseiten seines Hauses mit OPV auszustatten, wurden LCOE-Berechnungen durchgeführt, welche die Kosten und den Ertrag in Relation setzen. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt und zeigt durchschnittliche Kosten zwischen 0,5 und 0,7 €/kWh, je nach Fassadenanzahl, für OPV-Module mit ~5% Effizienz und fünf Jahren Lebenszeit. Durch die Semitransparenz von OPV-Modulen lassen sich zusätzlich zu opaken Fassadenflächen auch Fenster- und Glasfassaden für die gebäudeintegrierte Stromproduktion nutzen. Würde man die am EnCN entwickelten OPV-Folien in alle dafür in Frage kommenden Glasflächen in Deutschland integrieren (~680 km<sup>2</sup> mit statistisch verteilter Himmelsrichtungsorientierung), ergäbe sich ein zusätzlicher Jahresertrag von 22,7 TWh.

Die Kernbotschaft dieser Studie lautet: zusätzlich zu den schon vorhandenen Fassadenflächen können weitere Flächen erschlossen werden, wenn auch Fenster und Beschattungsanlagen mit PV ausgestattet werden.

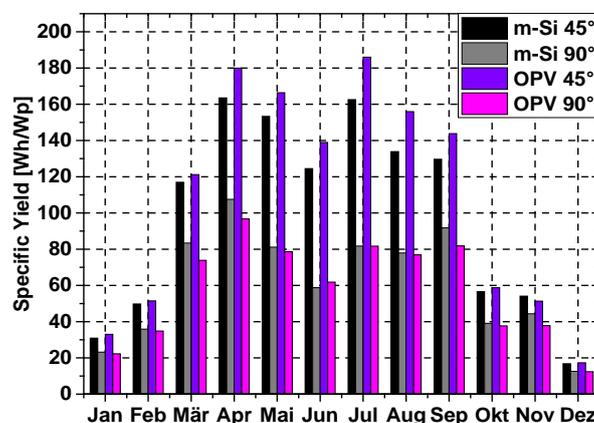


Abbildung 19: Gemessener Energieertrag von m-Si- und OPV-Modulen bei senkrechter (90°) bzw. schräger (45°) Installation mit südlicher Ausrichtung am Standort Erlangen.

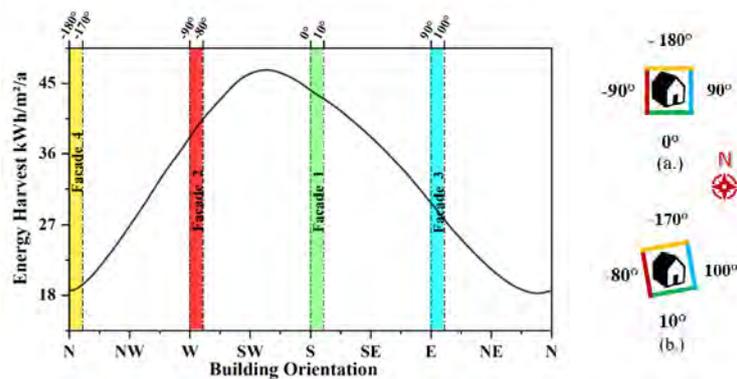


Abbildung 20: Simulierter jährlicher Energieertrag der SFF-OPV-Module in Abhängigkeit der Orientierung bei senkrechter Installation für den Standort Erlangen.

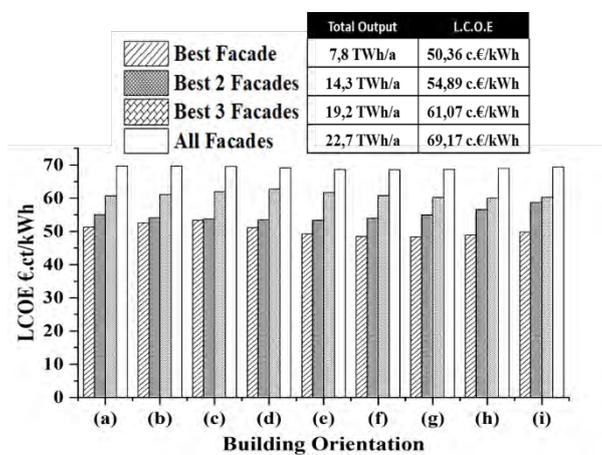


Abbildung 21: "Levelized Cost of Energy" (LCOE) für Fenster-integrierte OPV-Module in Abhängigkeit der Fassadenorientierung und potentieller jährlicher Ertrag für alle in Deutschland in Frage kommenden Fensterflächen.

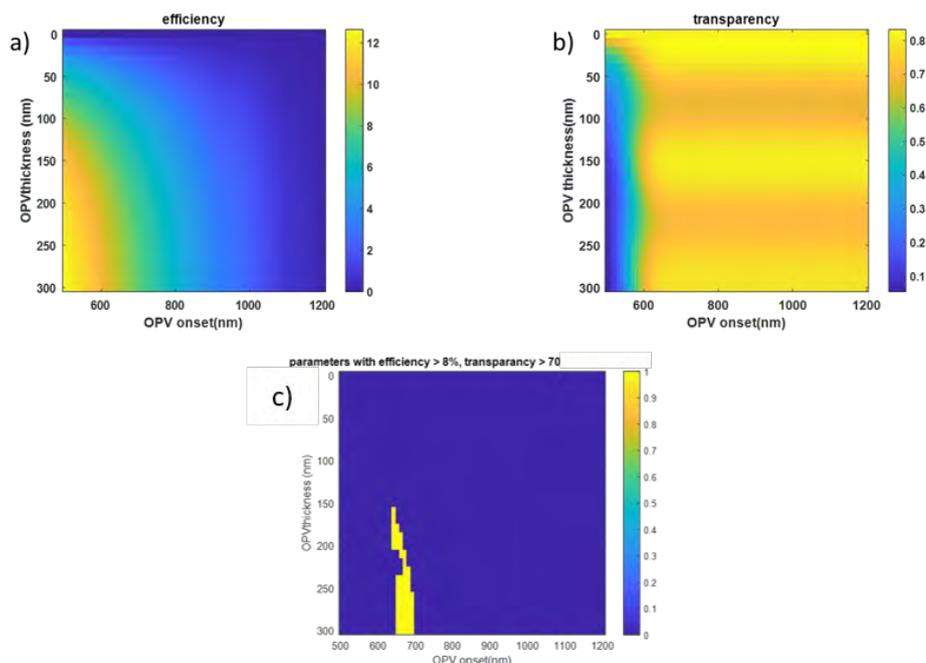


Abbildung 22: 2D Farbkarte von a) Effizienz und b) mit der Empfindlichkeit des Auges gewichteten Transparenz (AVT) einer organischen Solarzelle als Funktion der Schichtdicke und der spektralen Position der kurzwelligen Kante („OPV onset“) der Hauptabsorptionsbande der aktiven Schicht. c) Gleichzeitige Erreichbarkeit einer Effizienz >8% und einer AVT >70% (blau "nicht erreichbar" und gelb "erreichbar") für verschiedene OPV onset-Wellenlängen und Schichtdicken.

#### 4.2.2 Entwicklung von transparenter Photovoltaik für die energetische Aktivierung von Fensterflächen

Die Aktivierung von Fensterflächen für gedruckte PV wird gegenwärtig im Rahmen des EU-Projekts „Citysolar“ untersucht. Dazu werden hoch-transparente Perowskit-OPV-Tandemsolarmodule entwickelt, um den Einsatz in Fenstern zu ermöglichen. Ein Teilziel ist die Entwicklung organischer Solarmodule mit einer Transparenz (AVT) von  $\geq 70\%$  und Effizienz  $\geq 8\%$ . Um die Materialauswahl zu unterstützen, wurde eine Simulation von hypothetischen aktiven Materialien durchgeführt (Abbildung 22). Äußerst wichtig ist die Position der kurzwelligen Kante der Hauptabsorptionsbande der aktiven Materialien (OPV onset), die laut der Simulationen in Abbildung 22 nicht kurzwelliger als 650 nm sein darf. Experimentell wurden Materialien getestet, die diesen Anforderungen annähernd entsprechen und soweit optimiert, dass im Labor eine Effizienz von 7.5 % bei einer AVT von 60 % (exklusive der Top-Elektrode) erreicht werden konnte (Abbildung 23). Als nächster Schritt werden transparente Elektroden entwickelt, die mit photonischen Kristallen kombiniert werden können, um gezielt eine Rückreflexion im nahen Infrarotbereich zu erreichen und somit die Absorption des organischen Solarmoduls zu erhöhen, ohne dabei die Transparenz im sichtbaren Bereich zu verringern.

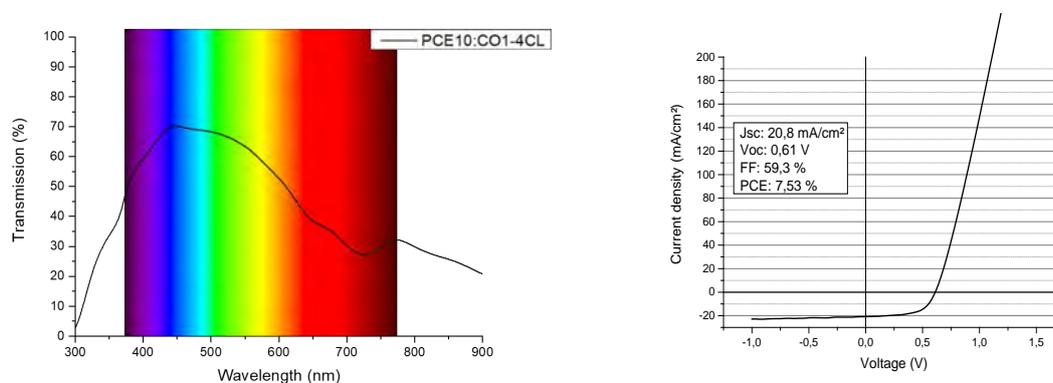


Abbildung 23: Organische Solarzelle mit aktiver Schicht aus Infrarot-Absorbern und einer resultierenden AVT = 60 %. Links: Transmissionsspektrum. Rechts: Strom-Spannungs-Charakteristik der Zelle.

#### 4.2.3 Entwicklung ultradünner organischer Photovoltaik-Module

Beschattungselemente sind Fassadenelemente, die insbesondere für Bürogebäude unverzichtbar sind, um Blendung am Arbeitsplatz und einen hohen Wärmeeintrag zu verhindern. Dazu wurde gemeinsam mit der Firma iba AG (Fürth) eine Beschattungsanlage aus beweglichen Lamellen entwickelt, die aus semitransparenten glaslaminierten OPV-Modulen bestehen (Abbildung 24). Durch die Semitransparenz werden starke Hell/Dunkel-Kontraste, wie sie bei klassischen Beschattungslamellen auftreten, vermieden.



Abbildung 24: Beschattungsanlage mit beweglichen Lamellen aus glaslaminierten OPV-Modulen

Um auch textile Beschattungselemente mit OPV-Modulen versehen zu können, ohne die textilen Eigenschaften zu verlieren, müssen diese leichter und flexibler werden. Dazu wurde im Rahmen einer mit dem EnCN-Energiepreis ausgezeichneten Masterarbeit eine neuartige Architektur für organische Solarzellen entwickelt, welche die Herstellung extrem dünner OPV-Module ermöglicht. Durch den Direktdruck des kompletten Solarzellen-Schichtaufbaus (inkl. Top- und Bottom-Elektrode aus Silbernandradröhten) auf eine Barrierefolie konnte so extrem dünne (85  $\mu\text{m}$ ) und leichte (135  $\text{g}/\text{m}^2$ ), vollständig verkapselte OPV mit einer spezifischen Leistung von 0.35  $\text{W}/\text{g}$  (20x höher als Silizium-PV-Module) hergestellt werden (Aufbau siehe Abbildung 25b). Die Solarzellen wiesen zudem eine ausgezeichnete Flexibilität auf und überstanden so 5000 Biegezyklen mit einem Biegeradius von 4 mm ohne jegliche Leistungsverluste; Bedingungen unter denen die Verkapselung von Standard-OPV-Modulen instantan delaminiert, was zum frühzeitigen Versagen der Module führt (siehe Abbildung 25, rechts).

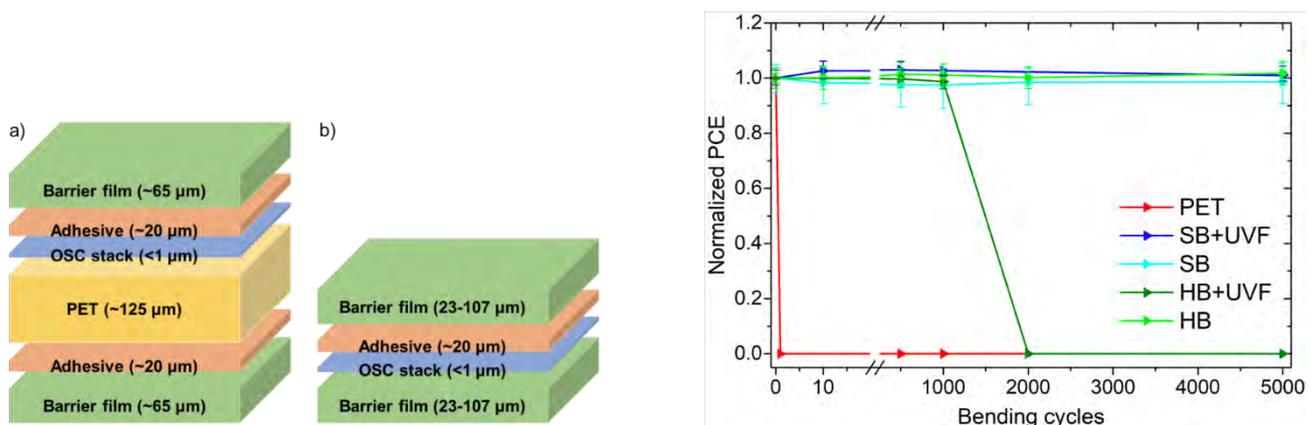


Abbildung 25: Links: Aufbau einer verkapselten organischen Solarzelle nach dem Stand der Technik (a) und die an der SFF neu entwickelte Architektur (b). Rechts: Biegetest (4 mm Biegeradius) von verkapselten organischen Solarzellen unterschiedlicher Architektur (rot: Standard-Aufbau (siehe Abbildung 25a), blau/grün: neu entwickelter Aufbau (siehe Abbildung 25b) mit unterschiedlichen Foliendicken).

### 4.3 Kooperationen

Im Laufe des EET TP4 wurden neben der Kooperation mit den EnCN-Partnern W. Heiß, A. Dentel und G. Kießling auch zahlreiche Projekte mit externen akademischen und industriellen Kooperationspartnern durchgeführt. Als momentane industrielle Partner (über das Institut für Materialien der Elektrotechnik und der Energietechnologie) sind v.a. die Firmen iba AG (Projekt zu Beschattungselementen), Armor SPF GmbH, ACX GmbH sowie der Innopark Kitzingen im Rahmen des BMWi-Projekts „Fassade<sup>3</sup>“ zu nennen. Im Rahmen der EU-Projekte „Booster“ und „Citysolar“ bestehen Kooperationen mit den Firmen Armor, Avantama AG, DUPONT TEIJIN FILMS UK LTD, Brilliant Matters und ENI SPA.

### 4.4 Ausblick

Im abgelaufenen Projekt konnte gezeigt werden, dass die gedruckte PV hohes Potential für die Realisierung der Energiewende im urbanen Raum bietet. Nach Projektende wird diese PV-Technologie daher an der FAU und am HIERN unter Ausnutzung ihrer einzigartigen Vorteile in Richtung verschiedener Anwendungen weiterentwickelt [11]. Konkret zu nennen sind hier das EU-Projekt „Citysolar“ zur energetischen Aktivierung von Fensterflächen, der gemeinsam mit den Projektpartnern W. Heiß (FAU), A. Dentel (THN) und R. Krippner (THN) eingereichte Projektantrag „OPV+“ im Rahmen des EnCN zur Kombination aus schaltbaren Fenstern mit transparenter Photovoltaik, ein eingereicherter ZIM-Antrag zum Direktdruck von Solarmodulen auf Aluminium-Fassadenelemente sowie ein geplanter ZIM-Antrag zur energetischen Aktivierung von Gastronomieschirmen und textilen Beschattungselementen in Gebäuden. Auch Anwendungen im Bereich Mobilität sind in Bearbeitung, z.B. in einem studentischen Projekt zur photovoltaischen Energieversorgung von Zeppelinen und in einem bewilligten DFG-Projekt zur Entwicklung ultraleichter und strahlungsresistenter PV-Module für die Raumfahrt.

## 5 Schlussworte

Die Teilprojekte des Projekts EET haben ihre im Antrag formulierten Ziele in vollem Umfang 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 in nahezu beliebiger Form auf nahezu beliebige Unterlagen zu drucken. Ein besonderes Glanzlicht stellt hier der vom ZAE Bayern aufgestellte Effizienzweltrekord für organische Solarmodule dar. Das weltweit einzigartige Know-how auf dem Gebiet der gedruckten PV ermöglichte die Ausgründung der Firma Sciprios, die entsprechende Druckmaschinen entwickelt und vertreibt. Die in Teilprojekt 2 entwickelten bildgebenden Messverfahren ermöglichen es einerseits, die in TP1 entwickelten Rolle-zu-Rolle-Prozesse in Echtzeit zu überwachen und damit eine zuverlässige Qualitätskontrolle in industrieller Umgebung zu etablieren. Zum anderen erlauben sie durch die Parallelisierung und Automatisierung der Testverfahren eine Beschleunigung der Material- und Prozessentwicklung. In Teilprojekt 3 wurden skalierbare Materialien und Prozesse entwickelt, um durch Beschichtung von Glas mit Nanopartikel-Suspensionen schaltbare Fenster herzustellen, die für die Erhöhung der Gebäudeeffizienz, speziell in Bürogebäuden, eine zentrale Rolle spielen können. Auch hier soll der technologische Vorsprung durch die Ausgründung einer Firma verwertet werden. In Teilprojekt 4 wurde durch das Langzeit-Monitoring semitransparenter OPV-Module und ihre Integration in eine multifunktionale Fassade die Praxistauglichkeit der im Rahmen des Projekts EET entwickelten Technologien bestätigt.

Im Nachgang dieses Projekts werden die erzielten Ergebnisse in mehrfacher Hinsicht verwertet. Zum einen werden die bestehenden und geplanten Ausgründungen des EnCN auf das erarbeitete Know-how zurückgreifen. Zum anderen werden die Ergebnisse genutzt, um gemeinsam mit industriellen und akademischen Partnern Projektanträge zu stellen, die auf die Weiterentwicklung der Technologie und insbesondere auf ihre Anwendung abzielen. Ein Antrag auf ein EnCN-Kooperationsprojekt zur Kombination schaltbarer Fenster mit gedruckter Photovoltaik und deren energetisches Monitoring in Testgebäuden wurde bereits eingereicht. Bei allen geplanten Aktivitäten wird unser besonderes Augenmerk darauf liegen, durch den systematischen Einsatz von Automatisierung und Künstlicher Intelligenz die weitere Entwicklung von Materialien und Prozessen um ein Vielfaches zu beschleunigen.

## 6 Vorträge & Poster

- [1] M.Steinberger. Inkjetprinting of OLEDs on 3D surfaces. Messe für organische und gedruckte Elektronik (LOPEC), 2021
- [2] E.N. Güler. Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells. 14th International Symposium on Flexible Organic Electronics, 2021
- [3] H.-J. Egelhaaf. Recent Advances in High Throughput Process Development. High Throughput PV Summer Seminar des iMEET/FAU, 2021
- [4] H.-J. Egelhaaf. Solarmodule aus dem Drucker - Die Solarfabrik der Zukunft. Gscheid Schlaue, 2021
- [5] H.-J. Egelhaaf. Solarmodule aus dem Drucker - Organische Photovoltaik. Vortrag vor Schülern des Hermann-Kesten-Kollegs Nürnberg, 2021
- [6] A. Distler. Scaling Efficiencies from mm<sup>2</sup> to m<sup>2</sup>. Emerging Topics Workshop am HI-ERN, 2021
- [7] T. Du. Towards efficient, fully printable perovskite solar cells and modules. Emerging Topics Workshop am HI-ERN, 2021
- [8] H.-J. Egelhaaf. High Throughput Production of Printed Photovoltaics. HOPE2021, 2021
- [9] E. N. Güler. Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells. EnCN-Jahreskonferenz, 2021
- [10] M. Wagner. High Throughput Material Screening of Organic Solar Cells on a Roll-to-Roll machine. EnCN-Jahreskonferenz, 2021
- [11] K. Senguttuvan. Investigations into the energy recovery potential of glass facade and window-integrated PV. EnCN-Jahreskonferenz, 2021
- [12] T. Du. Towards fully printable metal halide perovskite solar cells and modules. EnCN-Jahreskonferenz, 2021

- [13] H.-J. Egelhaaf. Photovoltaik aus dem Drucker: Städte unter Strom. EnCN-Jahreskonferenz, 2021
- [14] M. Steinberger. Improved Air Processability of Organic Photovoltaics by Using a Stabilizing Antioxidant to Prevent Thermal Oxidation. Materials Research Society, 2021
- [15] M. Steinberger. Inkjetprinting of Organic Electronics on 3D Objects. Materials Research Society, 2021
- [16] T. Heumueller, Can robots make more stable solar cells?, NGSE Emerging Topics Workshop 2021
- [17] O. Mashkov, S. Langner, E. Geffel, N. Killilea, A. Barabash, M. Sytnyk, C. Berger, J. Wagner, T. Stubhan, J. Hauch, C. J. Brabec, W. Heiss, Water-based Prussian blue ink optimization by using high-throughput robotic system for electrochromic smart windows, 11th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering, July 28-29 (2021) (Virtual Edition)
- [18] O. Mashkov, M. Sytnyk, A. Barabash, A. Eigen, M. Halik, E. D. Głowacki, S. Kawasaki, W. Heiss, Exfoliated carbon nitride/hydrogen-bonded organic pigment heterostructures for hydrogen peroxide generation, 11th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering, July 28-29 (2021) (Virtual Edition)

## 7 Veröffentlichungen

- [1] E.N. Güler; A. Distler; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells. Flexible and Printed Electronics, 7, 2022
- [2] M. Steinberger; A. Distler; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Improved Air Processability of Organic Photovoltaics by Using a Stabilizing Antioxidant to Prevent Thermal Oxidation. The Journal of Physical Chemistry, 122, 22, 2022
- [3] K.C. Tam; H. Saito; P. Maisch; K. Forberich; Y. Hisaeda; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Highly reflective and low resistive top electrode for organic solar cells and modules by low temperature silver nanoparticle ink. Solar RRL, 5, 2100887, 2021
- [4] K.C. Tam; P. Kubis; P. Maisch; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Fully printed organic solar modules with bottom and top silver nanowire electrodes. Progress in Photovoltaics, 29, 2021, <https://doi.org/10.1002/pip.3521>
- [5] O.J.J. Ronsin; D.J. Jang; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec; J. Harting. Phase-field simulation of liquid-vapor equilibrium and evaporation of fluid mixtures. Applied Materials & Interfaces, 13, 2021
- [6] D.J. Jang; F. Yang; L.R. Dong; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Upscaling of Perovskite Photovoltaics in Ahmad, Kazim, Grätzel (Eds.): Perovskite Solar Cells: Materials, Processes, and Devices, 453-496, 2021
- [7] H.-J. Egelhaaf; S. Feroze; A. Distler; M. Wagner; S. Bordin; M. Braun; G. Kießling; F. Hoga; K. Senguttuvan; M. Neberich; A. Dentel; C.J. Brabec. Fassadenelemente mit organischer Photovoltaik. BWK Energie Fachmagazin, 73, 16, 2021
- [8] F. Yang; D.J. Jang; L.R. Dong; S. Qiu; A. Distler; N. Li; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Upscaling Solution-Processed Perovskite Photovoltaics. Advanced Engineering Materials, 11, 2101973, 2021
- [9] F. Yang; L.R. Dong; D.J. Jang; B. Saparov; K.C. Tam; K.C. Zhang; N. Li; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Low Temperature Processed Fully Printed Planar Structure Perovskite Solar Cells with Carbon Electrode and Efficiency over 18 %. Adv. Energy Mater., 11, 2101219, 2021
- [10] I.C. Channa; A. Distler; B. Scharfe; S. Feroze; K. Forberich; B. Lipovšek; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Solution processed oxygen and moisture barrier based on glass flakes for encapsulation of Organic (Opto-) Electronic Devices. Flexible and Printed Electronics, 6, 025006, 2021
- [11] Y. Bonnassieux; C.J. Brabec; Y. Cao; T. Breen Carmichael; M.L. Chabiny; K.-T. Cheng; G. Cho; A. Chung; C.L. Cobb; A. Distler; H.-J. Egelhaaf; G. Grau; X. Guo; G. Haghiashtiani; T.-C. Huang; M. M. Hussain; B. Iniguez; T. Lee; L. Li; Y. Ma; D. Ma; M.C. McAlpine; Tse Nga Ng; R. Österbacka; S. N. Patel; J. Peng; H. Peng; J. Rivnay; L. Shao; D. Steingart; R. A. Street; V. Subramanian Luisa Torsi; Y. Wu. The 2021 Flexible and Printed Electronics Roadmap. Flexible and Printed Electronics, 5, 023001, 2021
- [12] M.K. Hamjah; M. Steinberger; K.C. Tam; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec; J. Franke. Aerosol jet printed AgNW electrode and PEDOT: PSS layers for organic light-emitting diode devices fabrication. 2021 14th International Congress Molded Interconnect Devices (MID), 1-4, 2021

- [13] A. Distler; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Organic Photovoltaic Modules with New World Record Efficiencies. *Progress in Photovoltaics*, 29, 24 – 31, 202
- [14] 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*, 2021, 5, 495.
- [15] A. Karl, A. Osvet, N. Li, C. J. Brabec, A General Guideline for Vertically Resolved Imaging of Manufacturing Defects in Organic Tandem Solar Cells, *Adv. Mater. Interfaces* 2020, 7, 1.
- [16] 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, 711–719, 2020
- [17] Y. Zhao et al. A bilayer conducting polymer structure for planar perovskite solar cells with over 1,400 hours operational stability at elevated temperatures, *Nature Energy*, accepted, <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00953-z>
- [18] 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, 1907801, 2020
- [19] 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, 1908305, 2020
- [20] A. Karl et al., Discriminating bulk versus interface shunts in organic solar cells by advanced imaging techniques, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 5, pp. 460–468, 2019
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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

## 8 Patente

- [1] H.-J. Egelhaaf; G.Spyropoulos; C.J. Brabec; T. Ameri; M. Salvador, Method for fabricating a solar module, sub-laminate for fabricating a solar module and solar module, erteilt, übernommen durch Erfinder
- [2] H.-J. Egelhaaf; K. Forberich; C.J. Brabec; L. Lucera, Verfahren zur Herstellung eines Schichtbauteils und zugehörige Vorrichtung, erteilt, übernommen durch Erfinder
- [3] H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec; F. Hoga; P. Kubis, Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Substrats, erteilt, übernommen durch Erfinder
- [4] H.-J. Egelhaaf; P. Kubis; M. Wagner et al., Method for manufacturing a semiconductor module and semiconductor module thus obtained, veröffentlicht, übernommen durch Armor
- [5] H.-J. Egelhaaf; E. Tam; P. Maisch; M. Wagner; A. Distler et al., Organic Solar Module and/or Fabrication Method, veröffentlicht, übernommen durch Cambrios
- [6] P. Maisch, L. Eisenhofer, E. Tam, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, M. Voigt, Method of applying upon a substrate a solid layer from a solution, veröffentlicht
- [7] H.-J. Egelhaaf; G. Spyropoulos; C.J. Brabec; T. Ameri; M. Salvador, Method and sub-laminate for fabricating a photovoltaic cell and photovoltaic cell, veröffentlicht

# W2 Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

## Projektbericht 2017 - 2021

Die W2 Professur beschäftigt sich mit der Synthese und der Anwendung verschiedener Halbleitermaterialien in Form von kolloidalen Nanokristallen, organischen Pigmenten oder auch von Metall-Halid-Perowskiten. Entwickelt werden druckbare Photodetektoren für den infraroten Spektralbereich aus Bleisulfid Nanokristallen. Das gleiche Material kommt auch für Solarzellen für den infraroten Spektralbereich zum Einsatz. Schwerpunkt liegt dabei, kostengünstige Prozesse für die Herstellung der Detektoren zu entwickeln, und deren Spektralbereich zu erweitern. Die Metall-Halid-Perowskite werden als Materialien in Röntgendetektoren getestet, die entweder Strahlung direkt in elektrische Signale konvertierende oder auf Strahlung in sichtbares Licht umwandeln. Auch grundlegend interessante Effekte wie die Selbstheilung dieser Halbleiter wurde untersucht. Es wurden im Besonderen auch Bestrebungen unternommen, speziell Perowskite aus in Bleifreien Materialien zu entwickeln, als umweltfreundlichere Alternativen zu den üblichen Blei-Halid Halbleitern. Um die Halbleitereigenschaften der Perowskite zu optimieren, wurde das epitaktische Wachstum von Halbleitermikrokristallen auf kristallinen Substraten untersucht. Das erlaubt letztlich kristalline dünne Halbleiterschichten zu gewinnen, ohne auf teure Wachstumsanlagen angewiesen zu sein. In Anbetracht der Einfachheit dieser Technologie wurden erstaunlicherweise relative gute Laserbauteile demonstriert. Des Weiteren wurden Elektroden aus organischen Pigmenten für die photokatalytische Generation von Treibstoffen wie Wasserstoffperoxid und Wasserstoff aus Wasser untersucht, als möglichst nachhaltige und umweltfreundliche alternative Energiequellen.

### KONTAKT

**Prof. Dr. Wolfgang Heiß**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



**E-Mail**

wolfgang.heiss@fau.de

**Telefon**

+49 911 56854-99216

# 1 Lösungsprozessierte Nanokristalle für Photodetektoren

Ein Schwerpunkt der Arbeiten der Professur beschäftigt sich mit lösungsprozessierten Halbleitermaterialien Materialien für die Entwicklung von Photodetektoren, vor allem für den infraroten Spektralbereich und eventuell auch für sichtbares Licht. Ein Materialsystem das dazu standartmäßig synthetisiert wird sind kolloidale Nanokristalle aus Bleisulfid. Hier wird besonderer Wert daraufgelegt, aus den kolloidalen Lösungen Tinten her zu stellen, die nach Abscheidung und Trocknung einen absorbierenden und halbleitenden Film ergeben, aus dem die Photodetektoren durch aufbringen von elektrischen Kontakten hergestellt werden. Diese Detektoren sollen möglichst schnelle Ansprechzeiten und hohe Verhältnisse zwischen Strom unter Beleuchtung und im Dunkeln zeigen. Diese Arbeiten werden durch Bemühungen ergänzt, die Lichtempfindlichkeit der Detektoren zu längeren Wellenlängen hin zu erweitern, die Langzeitstabilität der Detektoren zu verbessern, und die Druckbarkeit der Nanokristalle zu gewährleisten (Abbildung 1). Besonders interessant wäre natürlich die Realisierung von gedruckten Photodetektoren auf dünnen und flexiblen Substraten. In diesem Zusammenhang wurden in einer Zusammenarbeit mit der Universität Groningen (Prof. M.A. Loi) erste fundamentale Untersuchungen des Stromtransportes in PbS Nanokristalle-Transistoren auf biegsamen Substraten durchgeführt. Verbiegen der Substrate komprimiert oder dehnt die aufgetragenen Photoleitungsschichten aus Nanokristallen und ändert somit deren Leitfähigkeit. Während Kompression zu wesentlichen Verbesserungen der Leitfähigkeiten führt (45% Zunahme bei einer Verspannung von 2%) sinkt der Stromtransport merklich bei Dehnungen. Außerdem wurden Hinweise gefunden, dass auch die Dichte der elektronischen Defektzustände mit der aufgebrachten Verspannung variiert werden. Diese fundamentalen Einblicke in die Eigenschaften von Nanokristallfilmen, eröffnen die Möglichkeit aus Nanokristallfilmen Dehnungsmessstreifen zu entwickeln, schränken aber die Möglichkeiten ein, Nanokristallfilme zu flexiblen Photodetektoren zu verarbeiten. Mit der gleichen Arbeitsgruppe (Prof. M.A. Loi) wurde eine weitere Technologie für PbS Nanokristallfilme entwickelt, und zwar deren Dotierung. Während p-typ PbS Nanokristallfilme schon bisher leicht hergestellt werden konnten, fehlte vor allem die Möglichkeit der n-Dotierung. Dazu wurde ein organisches Molekül verwendet, welches die Nanokristalle über Elektronentransferprozesse dotiert. Untersucht wurden Transistorstrukturen, die nach Eintauchen in eine Lösung mit Dotiermolekülen einen verringerten Kanalwiderstand zeigten, kombiniert mit einer erhöhten Elektronenmobilität. Beides deutet auf eine erfolgreiche Dotierung der Nanokristallschicht, was eine entscheidende Grundlage für die Weiterentwicklung der Nanokristall-Elektronik bedeutet, zumal viele Bauelemente auf bipolaren Eigenschaften von Halbleitern beruhen. Als weitere fundamentale Eigenschaft der Nanokristallfilme wurden der Verteilungen von Defektzuständen untersucht. Wiederum in Transistorbauelementen, in denen unterschiedliche Dielektrika unter den Gate Kontakten verwendet worden sind, wurde gezeigt, dass Materialien mit hohen dielektrischen Zahlen zu einer Erhöhung der Defektzustände im Nanokristall-Kanal führen, als auch zu einer energetischen Verbreiterung dieser Zustände. Interessanter weise hat diese Zunahme der Defektzustände aber keinen Effekt auf die maximal erreichbare Mobilität in den Transistoren, was die Möglichkeit eröffnet, Nanokristallbauelemente auch bei niederen Spannungen zu betreiben.

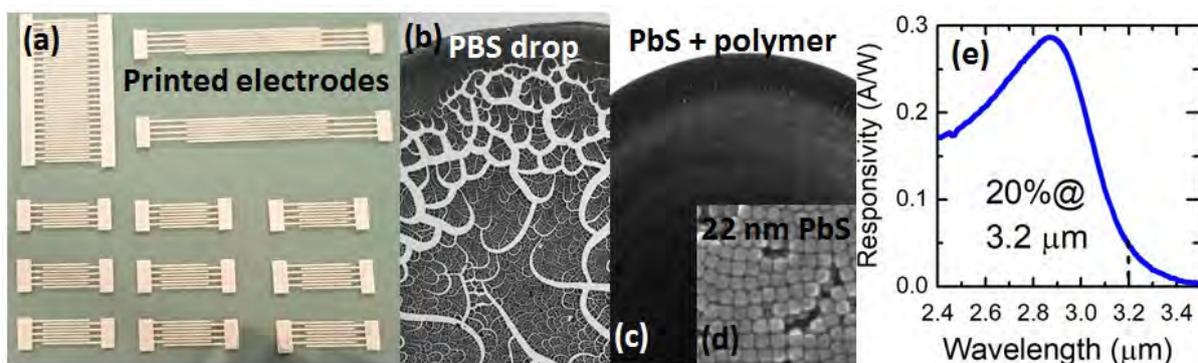


Abbildung 1: (a) Gedruckte Silberelektroden als Kontakte für Infrarotdetektoren basierend auf kolloidalen PbS Nanokristallen. (b) Ein Tropfen aus PbS Nanokristallen nach dem Trocknen auf Glas Substrat zeigt ein bizarres Muster aus Rissen, die jeglichen Stromtransport durch eine solche Schicht unterdrücken. (c) Eine geringfügige Zugabe eines Polymers zu den Nanokristallen verhindert die Bildung der Risse. (d) Elektronenmikroskopische Aufnahme der PbS Nanokristalle. (e) Die Nanokristallfilme zeigen eine Photosensitivität bis zu Wellenlängen im mittleren Infraroten Spektralbereich. (Copyright i-MEET, FAU)

Ein Schwerpunkt der Bemühungen ist die Weiterentwicklung der Synthesemethoden und Rezepte für die Herstellung der Nanokristalle. Die üblichen Synthesemethoden sind besonders für kleine Nanokristalle geeignet, mit Größen der Kristalle < 10 nm. In diesen Halbleiter Nanokristallen führen Quantisierungseffekte zu einer erheblichen Blauverschiebung der fundamentalen Bandlücke. Ist das Ziel Infrarotdetektoren herzustellen, die bis zu großen Wellenlängen arbeiten sollen, so ist dieser Quanteneffekt eher unerwünscht. Es war deshalb ein Ziel, besonders große Nanokristalle her zu stellen. Für Bleisulfid ist eine kritische Größe bei den Volumeneigenschaften erreicht werden sollten ca. 20 nm. Um nun Bleisulfid Nanokristalle mit größeren Dimensionen her zu stellen, wurde von uns eine neue Synthese entwickelt. Diese beruht auf der Verwendung neuer Ausgangsmaterialien und stellt die Kombination zweier früherer Synthesemethoden dar. Das Besondere der neu entwickelten Reaktion ist, dass sie vergleichsweise langsam abläuft, und deshalb auch besonders gut kontrolliert werden kann. Darüber hinaus ist diese Methode auch gut skalierbar, sodass auch größere Mengen hergestellt werden können, sie sie zum Beispiel zum Verdrucken benötigt werden. Diese neue Synthese liefert auch unüblich Große Nanokristalle und deren Größe kann über einen weiten Bereich eingestellt werden. Abbildung 2 zeigt Materialien die mit dieser Synthese hergestellt worden sind – die Teilchen sind dabei monodisperse und die erzielten Formen sind gleichförmig. Größen von ca. 6 nm bis zu ~ 170 nm wurden erreicht. Um aus diesen Nanokristallen ein elektronisches Bauteil herstellen zu können, wurde von uns neuartiger Oberflächenmoleküle verwendet, welche nach der Abscheidung und dem Trocknen eine elektrisch leitfähige Matrix bilden, die im Infraroten transparent ist. Mit den neuartigen Nanokristallen und den neuen Oberflächenmolekülen wurden Infrarotdetektoren demonstriert, die bis zu einer Wellenlänge von 3 Mikrometer arbeiten. Sie sind somit in etwa Vergleichbar mit den Detektoren, die kommerziell erhältlich sind und Z. B. in Infrarotspektrometern eingesetzt werden. Dabei waren die Photodetektoren auch relativ schnell, wobei sie Grenzfrequenzen erreichten, die oberhalb derer von kommerziellen Bleisulfid Detektoren liegen.

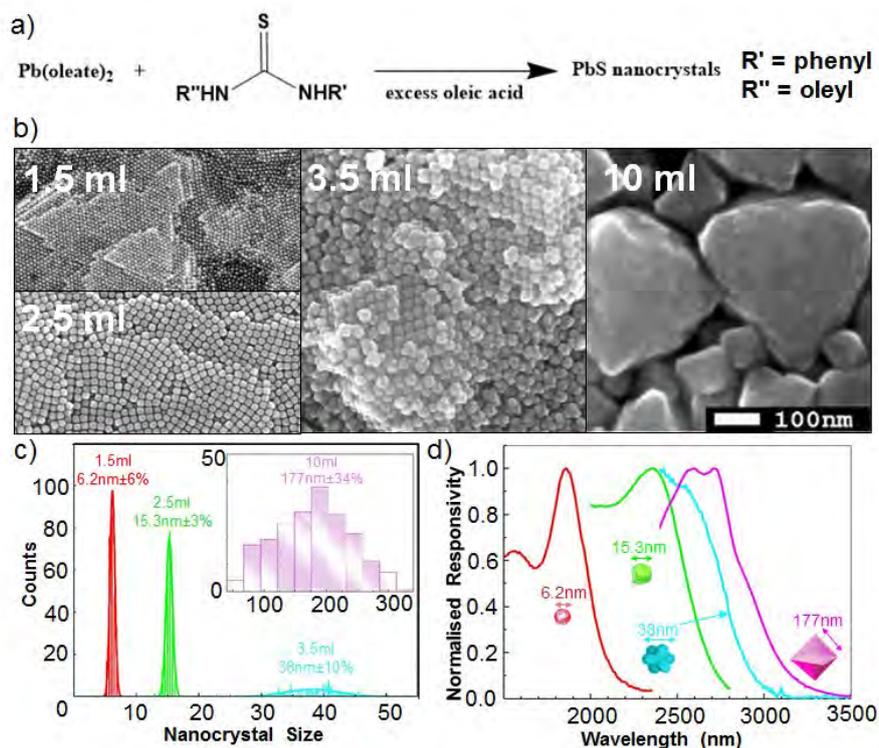


Abbildung 2: PbS Nanokristalle die mit einer neuen Synthese hergestellt worden sind. In Abhängigkeit der Menge der koordinierenden Liganden werden Nanokristalle mit verschiedenen Größen gewonnen. Die Nanokristalle zeigen eine schmale Größenverteilung und verschiedene Formen. Im Speziellen werden Photoleitungsspektren gemessen, die bis zu 3 Mikrometer Wellenlänge (der Bandlücke vom entsprechenden Volumenmaterial) sensitive Photoleitung zeigen.

Um Photodetektoren attraktiv für den Markt zu machen, sind nicht nur deren Eigenschaften wichtig, sondern auch deren Preis. In den Preis gehen dabei Materialkosten als auch Produktionskosten ein. Es ist deshalb auch ein Ziel, Methoden für die Herstellung von Detektoren auf zu zeigen, die einfach, schnell und günstig sind. Wir haben dazu gedruckte Photodetektoren demonstriert. Durch eine Kombination von Tintenstrahldrucken, 3-D Drucken und Abscheiden von Lösungen mit einem automatisierten Dispenser wurden Detektoren in kürzesten Zeiten gedruckt. Der Aufbau der Detektoren, die aus einer metallischen Elektrode, einer Nano-Partikel Zwischenschicht und einer aktiven Bleisulfid

Nanokristall Schicht bestehen, ist in Abbildung 3 gezeigt. Eine Wesentliche Entwicklung für die Herstellung der Photodetektoren aus der Lösung war dabei die Tintenformulierung der Bleisulfid Lösung. Während organische Polymere sehr einfach gedruckt werden können, zeigen Nanokristalllösungen einerseits eine zu geringe Viskosität zum Drucken und außerdem führen Trocknungsrisse üblicherweise zu unbrauchbaren Filmen. Als Lösung dieses Problems haben wir einen geringen Teil eines Polymers zu den Nanokristalltinten zu gefügt. Die gezeigten Methoden erlaubten auch ein einfaches Aufskalieren des Druckprozesses, und die Herstellung von Photodetektoren mit Eigenschaften, die gleich sind, wie die kommerziell erhältlichen Detektoren. Der Vorteil der gedruckten Detektoren ist der potentiell geringe Preis, und die Herstellung der Detektoren bei niederen Temperaturen. Letzteres ist nicht nur Energiesparend, sondern erlaubt auch die Integration der Nanokristallbauteile auf Silizium basierende elektronische Bauteile. Letzteres ist ein Wesentlicher Schritt in Richtung Hybridelektronik, die z. B. Verwendet werden kann um Siliziumkameras in den infraroten Spektralbereich zu erweitern. Derzeit werden in einem von der Industrie geförderten Projekt Nanokristalldetektoren entwickelt, die auf den bisherigen Resultaten aufbauen und eventuell für eine kommerzielle Nutzung verbessert werden. Außerdem wurde das Konzept der gedruckten Bauelemente wurde von einem Nachwuchswissenschaftler der Arbeitsgruppe auf mehreren Wettbewerben erfolgreich vorgestellt, was auch zu mehreren Auszeichnungen bei diesen Wettbewerben geführt hat.

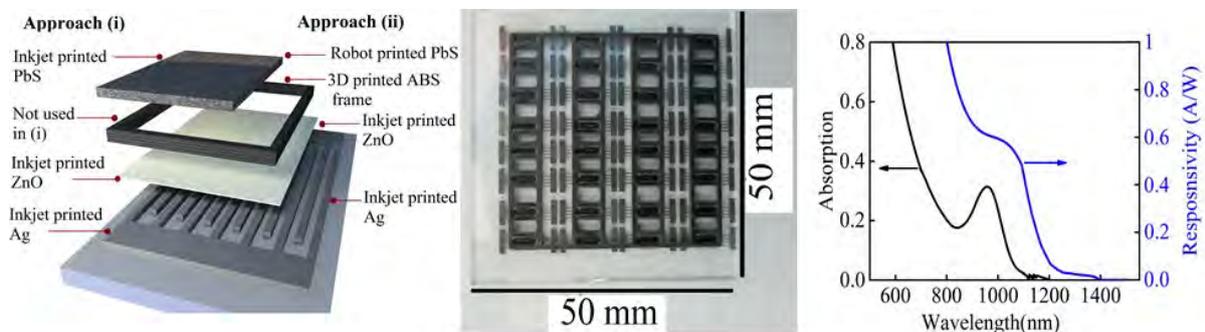


Abbildung 3: Gedruckte Photoleitungsdetektoren mit hohen Sensitivitäten im Infraroten. Links: Aufbau eines Detektors. Mitte: Ein gedrucktes Detektorarray mit 32 Detektoren. Rechts: Absorption der verwendeten Nanokristalle in kolloidaler Lösung und Responsivität eines gedruckten Detektors.

Die Entwickelten Druckprozesse für die Bleisulfid-Nanokristalle wurden in weiterer Folge auch auf Dispersionen aus zweidimensionalen Halbleitern übertragen. Das Interesse an zweidimensionalen Materialien geht auf Arbeiten von Andre Geim und Konstantin Novoselov (Nobelpreis 2010) zurück, die Graphit mechanisch abgeblättert und daraus atomar dünnes Graphen gewonnen haben. Graphen hat außerordentliche physikalische, mechanische und elektronische Eigenschaften, aber das Fehlen einer Bandlücke verhindert deren Einsatz in so manchen elektronischen Bauteilen, wie Transistoren. Nach dem Vorbild der Herstellung von Graphen wurden folgend auch weitere atomar einlagige und mehrlagige zweidimensionale Materialien verstärkt entwickelt und untersucht. Dabei wurden neue Methoden für die Präparation solcher geschichteten Materialien entwickelt, zum Beispiel durch Exfoliation eines vorher synthetisierten Festen Kristalls. Als weiteren zweidimensionalen Halbleiter haben wir in Zusammenarbeit mit der Technion - Israel Institute of Technology CrPS<sub>4</sub> untersucht. Während die Volumenkristalle aus der Dampfphase gewachsen wurden, haben wir durch chemische Exfoliation druckbare Tinten hergestellt. Dieses Material aus mehreren möglichen Metall-Phosphor-Tetrasulfid-Verbindungen ausgewählt, weil CrPS<sub>4</sub> ein Halbleiter mit einer direkten Bandlücke ist, und innerhalb dieser Materialklasse einen ungewöhnlichen hohen elektrischen Widerstand aufweist. Dieser macht CrPS<sub>4</sub> neben seinen günstigen optischen Eigenschaften zu einem vielversprechenden Material für Photodetektoren. Photoleitungsmaterialien sind die Grundlage sämtlicher Solarzellen, in welchen diese als Absorber eingesetzt werden. Von uns wurden mit den Tinten aus CrPS<sub>4</sub> die ersten komplett gedruckten Photodetektoren aus ternären „Van-der-Waals Halbleitern“ als aktive Komponente demonstriert. Diese Detektoren, die gedruckte Elektroden aus Graphen benutzen, zeigen unter Beleuchtung einen respektablen Photoleitungs-Effekt, mit einem spektralem Verhalten, welches für Einsätze in Solarzellen fast Ideal erscheint und eine gemessene Detektivität mit vielversprechenden Werten (Abbildung 4).

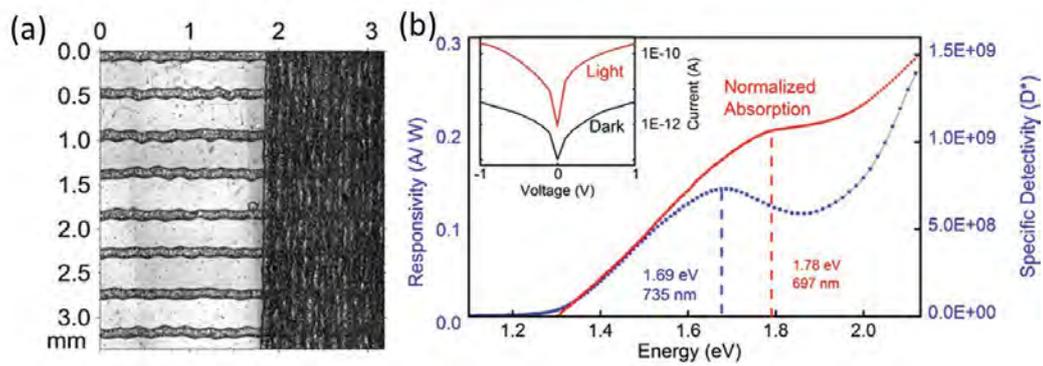


Abbildung 4: Zweidimensionale Halbleiter aus der Lösung als komplett gedruckte Photodetektoren. Die komplett gedruckten CrSP<sub>4</sub> Photodetektoren zeigen eine Photoresponsivität und Detektivität, die in etwa mit dem Absorptionsspektrum übereinstimmen und dabei den gesamten sichtbaren Spektralbereich abdecken. Insert: Strom-Spannungskennlinien in Dunkelheit und unter Beleuchtung.

## 2 Perowskite für die Röntgendetektion

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Projekts wurden mit der Infrastruktur am EnCN, kostengünstige und effiziente Materialien für die Herstellung von Wafern für die Röntgendetektion untersucht. Dabei haben wir uns auf Bismut (Bi) basierende Materialien spezialisiert. Aufgrund der besseren Stabilität wurden ausschließlich vollständig anorganische Halbleiter für die Untersuchungen verwendet, im Gegensatz zu Hybridmaterialien die unter starker Degradation leiden. Bei der Auswahl der Materialien wurde auch darauf geachtet, zumindest eine Zusammensetzung als Referenzsystem zu wählen, deren Synthese und deren Eigenschaften in der Literatur beschrieben und als besonders vielversprechend dargestellt worden sind. Die hier durchgeführten Synthesen wurden daher an die von Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> angepasst. Zunächst wurden Pulver und dann Wafer aus Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>I<sub>6</sub>, Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub>, Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> und auch aus BiI<sub>3</sub> hergestellt (Abbildung 5). Von diesen Materialien war zumindest Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>I<sub>6</sub> neu für die Röntgendetektion und Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>I<sub>9</sub> für Detektoren in Form von Wafern. Da in der Literatur beschrieben wurde, dass die Passivierung durch einen Oxidationsschritt sehr wichtig für die Funktion von Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>-Wafern ist, haben wir diesen Schritt ebenfalls gewählt, um zumindest als Referenz vergleichbare Ergebnisse mit der Literatur zu erhalten. Diese Passivierung, die zu einer Oberflächenschicht aus BiOBr führt, hat sich in der Tat als wichtig für Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> erwiesen, aber nicht unbedingt für die anderen Zusammensetzungen. Für BiI<sub>3</sub> ist der Passivierungsschritt sogar sehr ungünstig, weshalb diese Proben in unpassiviertem Zustand für die Messungen verwendet wurden.

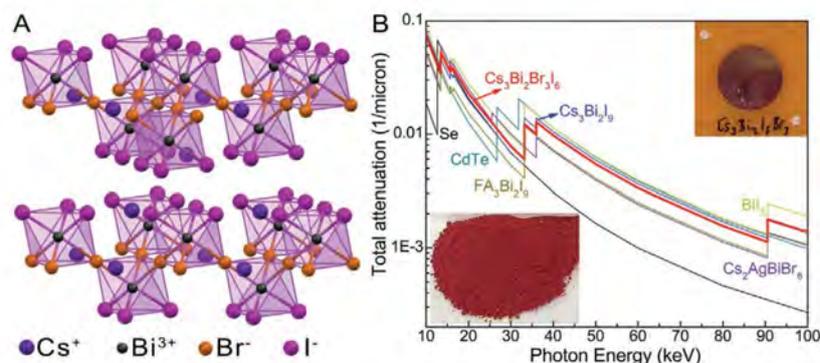


Abbildung 5: A) Die Kristallstruktur von Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>I<sub>6</sub> weist eine 2D-Topologie auf, die aus gewellten Schichten von Perowskit-ähnlichen Oktaedern besteht. B) Gesamtabsorptionskoeffizient verschiedener Bi-basierter Halogenide im Vergleich zu dem von CdTe und Se. Die Fotos zeigen Cs<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>I<sub>6</sub> in Form von Pulver (unten links) und als gepresstes Pellet (oben rechts).

In der Literatur über Röntgendetektoren aus Perowskiten wird immer die Empfindlichkeit als wichtigster Parameter genannt. Da die Empfindlichkeit aber nur das Verhältnis zwischen dem Photostrom und der Intensität der Röntgenstrahlung ist, kann dieser Wert durch einen Stromverstärker leicht erhöht werden. Die Stromverstärkung kann sowohl durch einen internen als auch durch einen externen Mechanismus erfolgen. Für Röntgendetektoren sind eine Reihe von Parametern entscheidend, die wir bei der Auswahl des besten Detektormaterials berücksichtigen haben - dazu gehören der Dunkelstrom und seine Stabilität, die Nachweisgrenze sowie das dynamische Verhalten des Detektors. Basierend auf diesen Parametern finden wir, dass  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$  unter den untersuchten Materialien am besten für den Röntgendetektor geeignet ist. Allerdings ist auch dieses Material in seiner Qualität nicht mit den bleihaltigen Perowskiten vergleichbar, die viel bessere Parameter erzielen, dafür aber giftig sind.

Im Verlauf von Stabilitätsstudien kamen wir zu einem sehr überraschenden Ergebnis - die  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$ -Wafer verbessern ihre Eigenschaften nach längerer Lagerzeit in mehrfacher Hinsicht. Der Dunkelstrom nimmt ab und seine Drift verschwindet sogar vollständig. Der Fotostrom nimmt zu und ist dann auch sehr stabil (Abbildung 6), das Rauschen nimmt ab und die Nachweisgrenze verbessert sich. Die Alterung hat also zu einer Verbesserung geführt, die nur als Selbstheilung interpretiert werden kann. Weitere Bemühungen, bessere Prozesse zur Herstellung der  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$ -Wafer zu finden, waren erfolgreich und haben zwar zu besseren Parametern geführt als unsere ersten Proben vor der Alterung zeigten, aber mit keinem Prozess war es möglich, so gute Werte zu erreichen wie durch den Alterungsprozess. Daher könnte die Alterung auch ein wichtiges Werkzeug zur Optimierung von Perowskit-basierten Bauelementen werden. Dabei muss es sich nicht nur um Röntgendetektoren handeln, sondern auch um andere optoelektronische Bauelemente wie Laser, Leuchtdioden, Fotodetektoren und Solarzellen.

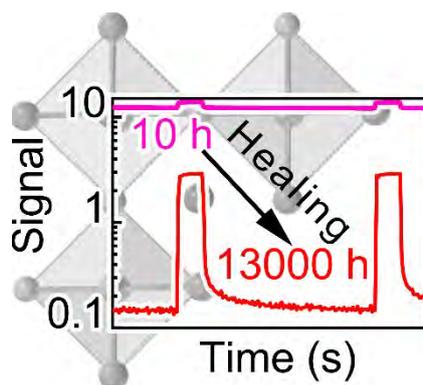


Abbildung 6: Auswirkung der Alterung auf das gemessene Signal einer  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$ -Waferprobe unter Beleuchtung mit Röntgenimpulsen.

Um die Auswirkungen der Alterung von  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$ -Wafers zu untersuchen, haben wir Röntgenbeugungsmessungen durchgeführt und mehrere Erkenntnisse gewonnen, die zur Verbesserung der Eigenschaften von Röntgendetektoren beitragen können. Insbesondere wurden Signale gefunden, die auf eine zweite, unerwünschte Phase in der frisch hergestellten Probe hinweisen. Nach der Alterung waren diese Signale jedoch verschwunden, was nur mit einer Rekrystallisation der Perowskite erklärt werden kann. Außerdem wurde festgestellt, dass die Beugungsmaxima nach dem Pressen der Wafer aufgespalten wurden, was auf eine Verspannung des Gitters hinweisen könnte. Diese Spannung hat sich jedoch nach der Alterung wieder entspannt. Dann wurden Peaks gefunden, die auf das passivierende Oxid zurückzuführen waren. Diese Maxima waren nach der Alterung intensiver und schmaler, was auf eine Verbesserung der Passivierungsschicht hinweist. Diese Röntgenbeugungsstudien liefern wertvolle Hinweise darauf, welche Prozesse in den  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_3\text{I}_6$ -Wafers zu den Verbesserungen führen, obwohl hier noch viel zu klären ist.

Weitreichendere Auswirkungen werden sich aus der Arbeit von Siemens Healthineers ergeben, zu der wir im Rahmen des DFG Projektes einen kleinen Beitrag leisten konnten. In dieser Arbeit wurde das Problem der Integration eines gepressten Perowskit-Wafers mit einer gepixelten TFT-Backplane unter vollständiger Beibehaltung der Funktion des Röntgendetektors gelöst. Es wurde eine Technologie entwickelt, bei der eine verflüssigte Perowskit-Zwischenschicht verwendet wurde, um den Wafer leitend mit der Backplane zu verbinden. Die Adhäsion des Wafers wurde dabei durch einen photolithographisch hergestellten Rahmen aus einem Photolack verstärkt. Es wurde ein Röntgen-Imager demonstriert, der eine bessere laterale Auflösung aufweist als ein kommerzieller Detektor, der auf der Verwendung eines Szintillators beruht. Darüber hinaus weist dieser Imager eine Nachweisgrenze auf, die besser ist als jeder jemals für ein

Perowskit als Detektionsmaterial veröffentlichte Wert. Dies zeigt deutlich das Potenzial von polykristallinen gepressten Wafern, wie sie in diesem Projekt untersucht wurden. Dennoch sind hier noch Verbesserungen erforderlich, sowohl was den Dunkelstrom als auch was das dynamische Verhalten des Imagers betrifft. Beides erfordert eine Verbesserung der Wafer, die durch eine Änderung der Zusammensetzung oder auch durch eine Verbesserung der Kristallinität - über das Wachstum einkristalliner Wafer - erreicht werden könnte.

Für die Detektion von Röntgenstrahlen werden je nach Energiebereich in der Medizin unterschiedliche Verfahren verwendet. Für Mammographie kommen Detektorarrays zum Einsatz, bei denen die Röntgenstrahlung direkt in elektrische Signale umgewandelt wird. Für Ganzkörper-Röntgenaufnahmen werden Szintillatoren verwendet, die Röntgenstrahlung zunächst in sichtbares Licht umwandeln, welches dann durch einen Lichtdetektor gemessen wird. Während mehrere Klassen verschiedener Szintillatoren am Markt sind und auch kommerzielle Anwendung finden, wurde 2018 von einer Universität aus Singapur in Zusammenarbeit mit mehreren Universitäten in China Nanokristalle aus Perowskiten als sensitive Röntgen - Szintillatoren eingeführt. Diese Perowskit-Nanokristalle zeigen ausnehmend günstige optische Eigenschaften wie hohe Lumineszenz-Effizienz, schnelle Rekombinationszeiten und auch hohe Absorption für Röntgenstrahlen. Außerdem können die Emissionsfarben der Perowskit-Nanokristalle durch deren Zusammensetzung und deren Dotierung mit Übergangsmetallen oder seltenen Erden einfach eingestellt werden. Basierend auf diese Eigenschaften haben wir in Zusammenarbeit mit Siemens Healthineers einen mehrfarbenen Röntgenszintillator vorgeschlagen (Abbildung 7), der erlauben sollte, den Röntgenaufnahmen auch eine gewisse Energieauflösung zu geben. Dieser Schritt, der mit direkten Röntgenkonvertern nicht einfach zu erreichen ist, ist vergleichbar mit dem Schritt vom schwarz - weiß Fernseher zum Farb-TV-Gerät. Die Energieauflösung in mehrere „Farben“ könnte zu einer verbesserten medizinischen Diagnostik führen, um Gewebe und Materialien mit ähnlicher Dichte besser auseinander halten zu können. Soweit beziehen sich unsere Vorschläge auf einfache Rechnungen und Materialvorschläge. Eine Umsetzung der Vorschläge würde allerdings noch ein weiterführendes Forschungsprojekt benötigen.

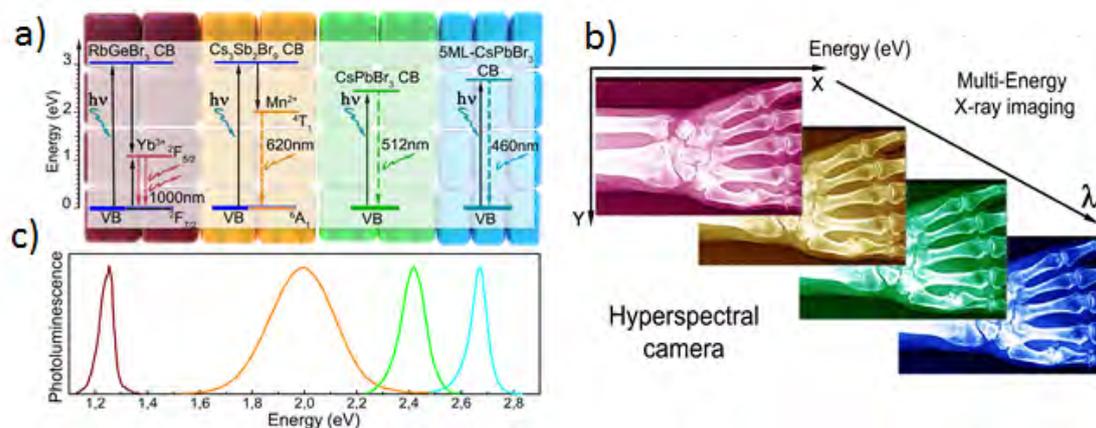


Abbildung 7: Vorschlag für einen Mehrfarben-Röntgen-Szintillator aus Perowskit-Nanokristallen. Röntgenstrahlung mit unterschiedlichen Energien führen zur Emission mit unterschiedlicher Farbe. a) vorgeschlagene Schichtfolge der (dotierten) Perowskit-Nanokristalle mit unterschiedlichen Emissionsprozessen. b) Die verschiedenen Schichten des Szintillators führen zu Emissionsspektren bei Energien zwischen 1,2 und 2,8 eV. c) Die Emissionsbilder werden mit einer hyperspektralen Kamera gemessen und analysiert.

### 3 Epitaktisches Wachstum von Halbleitern aus der Lösung

Das epitaktische Wachstum erlaubt es, kristalline Filme und Nanostrukturen auf kristallinen Substraten zu wachsen, wobei die atomare Anordnung der aufgewachsenen Strukturen dem des Substrates entspricht. Diese epitaktischen Filme sind deshalb einkristallin und üblicherweise von sehr hoher Qualität. Deshalb sind die meisten elektro-optischen Bauelemente wie Laser oder Leuchtdioden aus epitaktisch gewachsenen Halbleitern hergestellt. Auch Solarzellen aus epitaktischen Halbleitern weisen bessere Eigenschaften auf, als konventionelle polykristalline Typen, aus den verschiedenen üblichen Materialien der alten und neueren Solarzellengenerationen. Epitaktisches Wachstum wird deshalb auch mit Metal-Halid Perowskiten untersucht, wobei es auch Ansätze gibt, dieses spezielle Wachstum über

Lösungsprozesse zu erreichen. Der Vorteil dabei liegt auf der Hand, es werden keine superteuren Wachstumsanlagen gebraucht, wie sie in der Siliziumtechnologie oder auch in der III-V Halbleiterindustrie Anwendung finden. Wir haben das Tintenstrahl-Drucken von epitaktischen Metal-Halid-Perowskiten untersucht und zumindest auf einem Labormaßstab entwickelt. Speziell ist dabei, dass die Proben an Luft bearbeitet werden, Substrate für dieses Wachstum an der Oberfläche eine geordnete Anordnung der Atome aufweisen müssen, die nicht durch Oxidation oder andere Oberflächenreaktionen gestört werden. Des Weiteren muss die Anordnung der Oberflächenatome des Substrates zu der Atomanordnung der aufzuwachsenden Perowskite passen. Wir haben uns deshalb vorwiegend auf Substrate aus Blei-Chalcogeniden entschieden, die eine kubische Kristallstruktur aufweisen, ähnlich dem der Perowskite. Epitaktisches Wachstum hängt üblicherweise sensitiv von einigen Parametern ab, wie der Gitterfehlpassung, der Substrattemperatur und der Oberflächenbehandlung des Substrates. Für das Perowskit-Wachstum an Luft haben wir noch zusätzlich herausgefunden, dass die Luftfeuchtigkeit eine ganz entscheidende Rolle spielt. Erstaunlicherweise wurde besseres Wachstum bei höherer Luftfeuchtigkeit gefunden, was der Unterdrückung ungewünschter Phasen des Perowskites zugeschrieben werden konnte. Durch Kontrolle der Abscheidebedingungen wurden zunächst geordnete Perowskitstrukturen gewachsen (Abbildung 8), deren Ordnung epitaktisches Wachstum bestätigen, und auch zusammenhängende Filme, ähnlich wie sie in Vakuum-basierenden Epitaxieanlagen hergestellt werden. Epitaktisches Wachstum wurde schließlich für verschiedene Perowskite auf verschiedenen Substraten erzielt, unter anderem auch auf GaAs oder auf Katzensgold. Diese Arbeiten stellen vermutlich einen Meilenstein in Bezug auf die Anwendungen von Perowskit-Halbleitern dar, die aus der Lösung üblicherweise polykristalline Filme ergeben, deren elektrischen und optischen Eigenschaften unter Zahlreichen Defekten leiden. Die epitaktischen Strukturen, dagegen, zeigen optische Eigenschaften die vergleichbar mit denen von Einkristallen sind, und auch interessante Effekte, wie die Stabilisation der Perowskit-Kristallstruktur durch das Substrat.

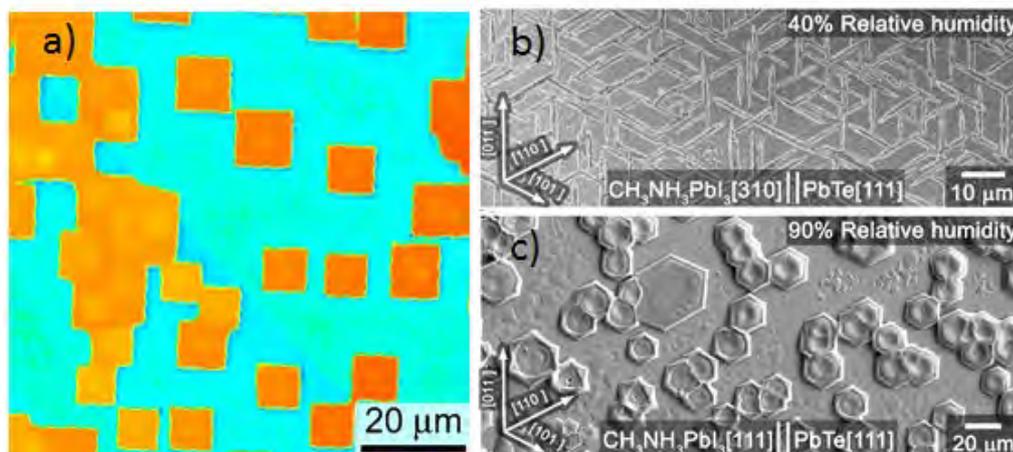


Abbildung 8: Epitaktische Perowskit-Strukturen verschiedener Orientierung. a)  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  auf  $[100]$   $\text{PbS}$ .  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  auf  $[111]$  orientiertem  $\text{PbTe}$  gewachsen bei normaler b) und c) erhöhter Luftfeuchtigkeit.

Neuerdings haben wir das epitaktische Wachstum von Perowskiten von Tintenstrahl-Drucken auf das noch einfachere Auftropfen umgestellt. Wichtig ist dabei, dass man die geeigneten Abscheideparameter verwendet, wie Substrattemperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung, die gleich gehalten werden wie bei dem vorher entwickelten Drucken. In Bezug auf die Konzentration der Ausgangsmaterialien im Lösungsmittel ist man allerdings freier, so dass man über Variation der Konzentration auch die mittlere Größe der entstehenden Mikrokristalle auf den kristallinen Substraten einstellen kann. Damit lassen sich Kristallite abscheiden, die groß genug sind, um als Laserresonatoren zu wirken. Das wird vor allem durch die Steilheit der Seitenflächen der Mikrokristalle unterstützt, welche normal zur Substratoberfläche wachsen. Besonders wichtig ist allerdings eine nahezu perfekte Gitteranpassung des abgeschiedenen Materials auf das Substrat. Für letzteres wurden hier Bleisulfid Einkristalle verwendet, während das abgeschiedene Material ein Formamidinium Bleibromid Perowskit ist. Dieser zeigt unter optischer Anregung nicht nur Lumineszenz sondern über einer Schwell-Pumpleistung auch Lasertätigkeit. Dies beweist nicht nur die hohe Qualität des abgeschiedenen Perowskiten, sondern ist auch ein sehr überraschendes Ergebnis, wenn man bedenkt, dass das Substrat bei der Laserwellenlänge vollkommen absorbiert und auch keinen Totalreflexions-Eigenschaften aufweist. Simulationen zeigen aber, dass der Brechungsindexsprung zwischen Substrat und Perowskit ausreicht, um in den Mikroresonatoren eine

Wellenausbreitung zu erlauben, sofern diese Welle streng parallel zur Grenzfläche zwischen Substrat und Mikroresonator läuft.

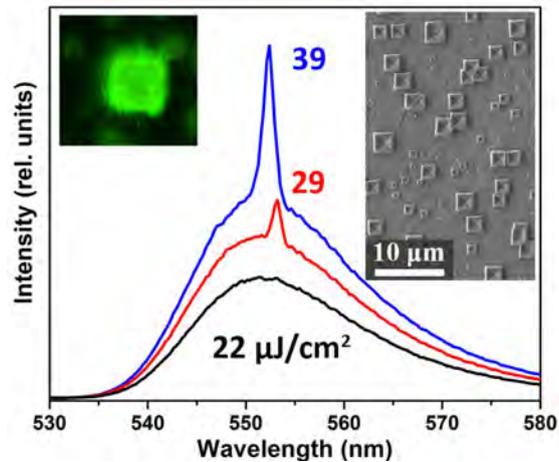


Abbildung 9: Lasertätigkeit von epitaktischen Perowskiten unter optischer Anregung. Die schmalen Linien auf den breiten Spektren sind charakteristisch für die Laseremission. Das linke Insert zeigt einen leuchtenden Mikroresonator und das rechte zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme einiger epitaktisch gewachsener Kristalle, die auch als Laser-Mikroresonatoren wirken.

## 4 Organische Pigmenthalbleiter

Ein weiteres Halbleitersystem das neben den Nanokristallen und den Perowskiten in der Gruppe der W2 Professur bearbeitet wird, sind organische Pigmenthalbleiter. Organische Pigmente werden üblicherweise in Farben eingesetzt und sind deshalb ziemlich stabil. Eine Klasse dieser organischen Pigmente sind sogenannte Indigoide, also Verwandte des Farbstoffes der ursprüngliche den Blue-Jeans-Hosen das charakteristische Blau verliehen hat. Ein Isomer zu dem klassischen Indigo ist Epindolidione (EPI), das gelbe Farbe aufweist. EPI ist nicht nur ein Färbemittel, sondern es kann auch halbleitende Eigenschaften aufweisen. Transistoren aus diesem Farbstoff vereinen zum Beispiel gute elektrische Mobilität mit hoher Stabilität. Mit diesen Pigmenten haben wir gezeigt, dass sie sich für die elektro-photokatalytische Generation von hochenergetischen Treibstoffen eingesetzt werden können. Besonders eignen sie sich für die Reduktion von Sauerstoff, der in Wasser gelöst ist, zu Wasserstoffperoxid. Aufbauend auf diese Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit der Linköping Universität (Gruppe von E. D. Glowacki) Nanokristalle aus organischen Pigmenten synthetisiert, die in Wasser dispergiert unter Sonneneinstrahlung das gleiche zustande bringen, ohne dass dabei eine zusätzliche elektrische Spannung angelegt werden muss. Stattdessen werden organische Opfer-Substanzen (Donatoren) verwendet die oxidiert werden. Mit Nanopartikeln aus Epindolidione wurden auf photokatalytischem Weg die höchsten jemals berichteten  $\text{H}_2\text{O}_2$  Gleichgewichtskonzentrationen erzielt. Außerdem wurde die Möglichkeit untersucht, mit Epindolidione Wasser elektrokatalytisch in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten. Erste Versuche dazu ergaben dazu keine unbedingt schlüssigen Nachweise. Deshalb haben wir in Zusammenarbeit mit der Nagoya Technology University in Japan diese organischen Pigment Elektroden für die Wasserspaltung weiterentwickelt. Anstatt von reinen Schichten aus dem Epindolidione (Abbildung 10a) wurden Heterostrukturen untersucht, die über eine erleichterte Ladungstrennung zu einer verbesserten Wasserspaltung führen sollten. Die Heterostrukturen bestanden dabei aus Epindolidione (EPI) und einem Epindolidione-Derivativ (2F-EPI). Beide Materialien zeigen ähnlich kristalline Eigenschaften, sie formen jeweils dünne Plättchen (Abbildung 10b), weshalb sie bei einer Abscheidung gut aufeinander wachsen. Mit diesen EPI-Heterostrukturen wurde einerseits die photokatalytische Generation von  $\text{H}_2\text{O}_2$  verbessert und andererseits auch die Wasserspaltung eindeutig nachgewiesen. Nachdem Wasserstoff den Energieträger der zukünftigen Mobilität darstellt, sind diese Ergebnisse eventuell auch richtungsweisend, um mit Sonnenstrahlung und einfachen Farbpigmenten zukünftig auf einfache und nachhaltige weise Treibstoffe zu gewinnen.

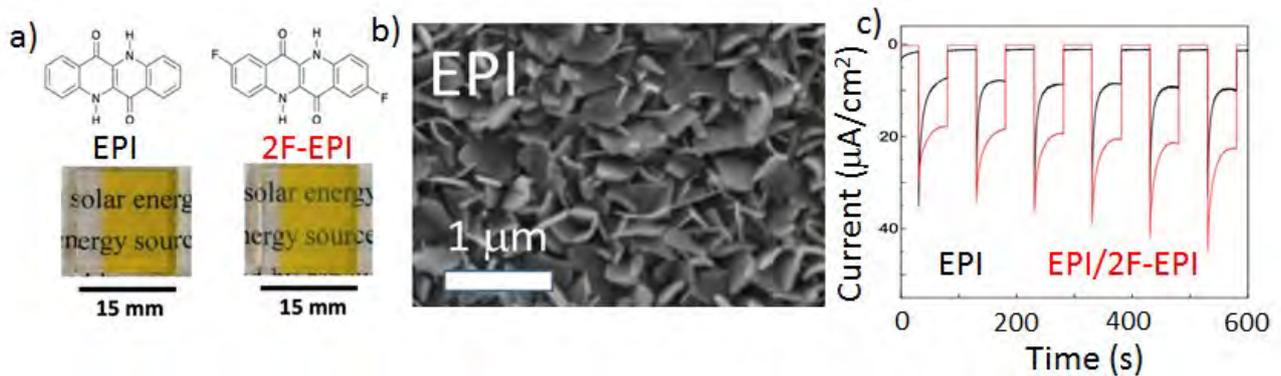


Abbildung 10: Strukturformeln und aufgedampfte Filme aus Epindolidione (EPI) und einem Derivat mit zwei angehängten Fluor Atomen. b) Oberfläche einer aufgedampften EPI-Schicht bestehend aus dünnen Plättchen. c) Strom gemessen in einer Elektrochemischen Zelle unter gepulstem Lichteinfall und Sauerstoffentzug. Die Stromstärke, die der Wasserstoffgeneration proportional ist, ist für eine zweilagige Heterostruktur deutlich erhöht.

Für die photokatalytischen Anwendungen ist ein Transfer der photoangeregten Ladungsträger von den organischen Halbleitern über deren Oberfläche zu Molekülen notwendig, die im Wasser gelöst sind. Um diesen Transfer zu maximieren wurden von uns Nanokristall-Architekturen aus organischen Pigmenthalbleitern synthetisiert, welche speziell große Oberflächen aufweisen. Diese ergeben sich zum Beispiel, wenn die Nanokristall-Architekturen aus Nanodrähten bestehen die sich Gruppieren und schließlich die Form eines Igels aufweisen. Mit diesen Nanokristall-Architekturen wurde in Zusammenarbeit mit der Johannes-Kepler-Universität Linz und der Linköping Universität ein besonderes Forschungs-Highlight erzielt. Diese Nanokristall-Architekturen wurden benutzt um menschliche embryonale Leberzellen, die auf den Nanokristall-Architekturen kultiviert worden sind (Abbildung 11), mit Licht zu stimulieren. Einzelne Leberzellen reagieren auf Photo-Stimulation nur dann, wenn sie einen engen Kontakt zu den Nanoarchitekturen aufweisen. Die Zellen selbst sind für das anregende Licht transparent, während in den Nano-Architekturen Ladungsträger angeregt werden. Diese angeregten Ladungsträger induzieren elektrische Signale in den aufgewachsenen Zellen, aufgrund von Ionenströmen durch die Zellmembrane. Solche Ionenströme werden entweder thermisch getriebenen, aufgrund einer lokalen Aufheizung der Zellen über die Nanokristall-Architekturen, oder kapazitiv induziert, aufgrund von oberflächennahen, photo-induzierter Ladungen. Diese beiden Arten von Ionenströmen konnten an einzelnen Zellen aufgrund ihrer Dynamik unterschieden werden. Wichtig ist dabei, dass die Photo-Stimulationen der Zellen unter physiologischen Bedingungen erzielt werden konnten. Dies ist nicht nur von fundamentalem Interesse, sondern könnte auch für die Entwicklung einer künstlichen Retina eingesetzt werden, die erblindeten Patienten implantiert werden könnten. Eine große Bedeutung für diese Photo-Stimulation spielt dabei die Grenzfläche zwischen den Zellen und den Nanokristall-Architekturen, da jeglicher Spalt zwischen den Strukturen dabei zu einer Verringerung der induzierten Signale führen würde. Besonders Vorteilhaft in diesem Zusammenhang ist, dass die organischen Nanostrukturen eine Oberfläche aufweisen, an die die Zellen gerne aufwachsen, und dass die Nanodrähte der Architekturen mechanisch flexibel sind und sich deshalb an die Oberfläche der Zellen anpassen können.

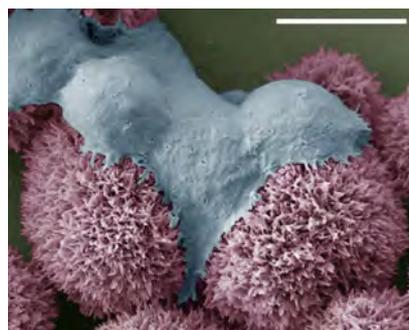


Abbildung 11: Nanokristall-Architekturen (rosa) überwachsen mit humanen embryonalen Leberzellen (hellblau). Die Nanoarchitekturen ermöglichen eine Photostimulation der aufgewachsenen Zellen. Skala (10 µm), Copyright i-MEET, FAU

## 5 Schlussworte

Die vielversprechendsten Ergebnisse in Bezug auf unmittelbare Anwendungen sind unter den durchgeführten Arbeiten eventuell mit den gedruckten Nanokristalldetektoren erzielt worden. Diese Arbeiten werden deshalb auch momentan von einer Firma direkt finanziert und am ENCN weitergeführt. Die Forschung in Bezug auf selbstheilende Perowskit-Halbleiter haben zu überraschenden Ergebnissen geführt, welche vermutlich nicht nur für Röntgendetektoren Implikationen haben werden, sondern auch für andere elektronische Bauteile sehr günstig sein können. Die Epitaxie aus der Lösung steht noch in den Kinderschuhen und die ersten Ergebnisse mit diesen Materialien als Laserresonatoren deuten hier auf ein enormes Potential. Ein besonderes Highlight sind auch die Lichtanregung von einzelnen Zellen über organische Pigment-Nanostrukturen, die vor allem für die Entwicklung einer künstlichen Retina von hohem Interesse sind. Mit dem gleichen Material, aufgetragen auf eine Photoelektrode, wird unter Sonneneinstrahlung Wasser in einen hochenergetischen Treibstoff umgewandelt. Diese Photokatalyse zeigt einen alternativen Weg auf, um erneuerbare Energien für die Mobilität in Kraftfahrzeugen oder auch für andere Anwendungen zu gewinnen.

## 6 Vorträge & Poster

- [1] W. Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals, Nanoscience with Nanocrystals, 2017
- [2] AmirAbbas Yousefi Amin, Fully Inkjet-Printed Nanocrystal Infrared Photodetectors, Nanoscience with Nanocrystals, 2017
- [3] Wolfgang Heiss, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, The International Conference on Materials Science and Engineering, Egypt-Japan University of Science and Technology, New Borg El- Arab, Alexandria, Egypt, March 11-13 (2018)
- [4] John Jairo Prias-Barragan, Katherine Gross, Jose D Perea, Nial Kilallea, Wolfgang Heiss, Christoph Brabec, Hernando Ariza-Calderon, and Pedro Prieto, Graphite Oxide Obtained from Bamboo as Possible Selective Contact for Solar Cells, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V., Fachverband Halbleiterphysik, Berlin, März 11-16 (2018)
- [5] Wolfgang Heiss, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals Symposium Photophysics, nanomaterials and more, University of Groningen, Groningen, NL, April 20 (2018)
- [6] Wolfgang Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals: Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, Colloquium on Advanced Materials, Universität Heidelberg, Heidelberg, June 7 (2018)
- [7] Wolfgang Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals: Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, 7th International Conference on Smart Materials and Structures" (Smart Material Congress 2018), Vienna, July 2-3 (2018)
- [8] Oleksandr Mashkov, Mykhailo Sytnyk and Wolfgang Heiss, Organic pigments nanoarchitectures for heavy metal removal from water, Particle Based Materials Symposium, Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg, Erlangen, September 20-21 (2018)
- [9] N. Killilea, M. Wu, M. Sytnyk, A. Amin, E. Spiecker, W. Heiss, Bulk-like PbS Nanocrystals with Epitaxial Ligands Providing Photodetection Beyond 3000nm, Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg, Erlangen, September 20-21 (2018)
- [10] Oleksandr Mashkov, Mykhailo Sytnyk and Wolfgang Heiss, Organic pigments nanoarchitectures for heavy metal removal from water, nanoGe Fall Meeting 2018, Torremolinos, Spain, Oct 22-26 (2018)
- [11] Adam K. Budniak, Niall A. Killilea, Amir Abbas Yousefi Amin, Szymon J. Zelewski, Jan Kopaczek, Esty Ritov, Yaron Amouyal, Wolfgang Heiss, Robert Kudrawiec and Efrat Lifshitz, Synthesis, exfoliation and investigation of CrPS<sub>4</sub>, MRS Fall Meeting, Boston, USA, November 25-30 (2018)
- [12] M. Sytnyk, AA Yousefi Amin, T. Freund, W. Heiss, C. Harreiss, E. Spiecker, V.V. Volobuev, J. Korczak, T. Story, G. Springholz, A. Pfnür, K. Götz, T. Unruh, K. Singh, O. Voznyy, O. Lytken. Epitaxial Metal Halide Perovskites by InkJet Printing. nanoGe Fall Meeting19, Berlin, November 8 (2019)
- [13] X. Du, H.-J. Egelhaaf, B. Fan, T. Fauster, J. Hauch, W. Heiß, R. Hock, N. Killilea, G. Matt, D. Niesner, A. Osvet, N. Li, S. Shrestha, T. Stubhan, M. Sytnyk, J. Wagner, AA. YousefiAmin, and Ch. Brabec, Development of New Semiconductors for Solution Processed Solar Cells and X-ray Detectors, DGM Regionalforum – Erlangen, April 2 2019, Erlangen (2019)

- [14] J.E. Elia, I. Levchuk, A. Osvet, K. Forberich, M. Sytnyk, M. Batentschuk, T. Unruh, W. Heiss and Christoph J. Brabec. Epitaxial Growth of CsPbBr<sub>3</sub> on Different Substrates with Hexane/Octane Pre-Wetting, 5th international conference on perovskite solar cells and optoelectronics (PSCO 2019), Lausanne, September 30 – October 2 (2019)
- [15] W. Heiss, Solution processed semiconductors for medical applications, 27th Assembly of Advanced Materials Congress, Conference Centre, M/S Mariella, Stockholm (2019)
- [16] W. Heiss, M. Sytnyk, Epitaxial metal halide perovskites by inkjet printing, ngse4-Next Generation Solar Energy conference, December 8-10 (2019)

## 7 Veröffentlichungen

- [1] M. Sytnyk, M. Jakesova, M. Litvinukova, O. Mashkov, D. Kriegner, J. Stangl, J. Nebesarova, F. W. Fecher, W. Schofberger, N.S. Sariciftci, R. Schindl, W. Heiss, E. D. Glowacki, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic semiconductor hierarchical nanocrystals, *Nature Communications* 8, 91, 2017
- [2] S. Shrestha, R. Fischer, G.J. Matt, P. Feldner, T. Michel, A. Osvet, I. Levchuk, B. Merle, S. Golkar, H.W. Chen, S.F. Tedde, O. Schmidt, R. Hock, M. Ruhrig, M. Goken, W. Heiss, G. Anton, C.J. Brabec, High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers, *Nature Photonics* 11, 436, 2017
- [3] M.I. Nugraha, S. Kumagai, S. Watanabe, M. Sytnyk, W. Heiss, M.A. Loi, J. Takeya, Enabling Ambipolar to Heavy n-Type Transport in PbS Quantum Dot Solids through Doping with Organic Molecules, *ACS Applied Materials&Interfaces* 9, 18039-18045, 2017
- [4] M.I. Nugraha, R. Hausermann, S. Watanabe, H. Matsui, M. Sytnyk, W. Heiss, J. Takeya, M. A. Loi, Broadening of Distribution of Trap States in PbS Quantum Dot Field-Effect Transistors with High-k Dielectrics, *ACS Applied Materials & Interfaces* 9, 4719-4724, 2017
- [5] M. Sytnyk, S. Yakunin, W. Schofberger, R.T. Lechner, M. Burian, L. Ludescher, N.A. Killilea, A.A. YousefiAmin, D. Kriegner, J. Stangl, H. Groiss, W. Heiss, Quasi-epitaxial Metal-Halide Perovskite Ligand Shells on PbS Nanocrystals, *ACS Nano* 11, 1246-1256 (2017)
- [6] M. Richter, T. Heumüller, G. J. Matt, W. Heiss, C. J. Brabec, Carbon Photodetectors: The Versatility of Carbon Allotropes, *Advanced Energy Materials* 7, 1601574, 2017
- [7] M. I. Nugraha, H. Matsui, S. Watanabe, T. Kubo, R. Häusermann, S. Z. Bisri, M. Sytnyk, W. Heiss, M. A. Loi, and J. Takeya, Strain-Modulated Charge Transport in Flexible PbS Nanocrystal Field-Effect Transistors, *Adv. Electron. Mater.* 3, 1600360, 2017
- [8] (M. Sytnyk, S. Deumel, S. F. Tedde, G.J. Matt, W. Heiss, A Perspective on the Bright Future of Metal Halide Perovskites for X-Ray Detection. *Appl. Phys. Lett.* 2019, 115 (19). (C)
- [9] (A. A. Yousefi-Amin, N. A. Killilea, M. Sytnyk, P. Maisch, K. C. Tam, H. J. Egelhaaf, S. Langner, T. Stubhan, C. J. Brabec, T. Rejek, et al. Fully Printed Infrared Photodetectors from PbS Nanocrystals with Perovskite Ligands. *ACS Nano* 2019, 13 (2), 2389–2397. (B)
- [10] A. K. Budniak, N. A. Killilea, S. J. Zelewski, M. Sytnyk, Y. Kauffmann, Y. Amouyal, R. Kudrawiec, W. Heiss, E. Lifshitz, Exfoliated CrPS<sub>4</sub> with Promising Photoconductivity. *Small* 2019, 1905924, 1–10. (B)
- [11] N. Killilea, M. Wu, M. Sytnyk, A.A. Yousefi Amin, O. Mashkov, E. Spiecker, W. Heiss, Pushing PbS/Metal-Halide-Perovskite Core/Epitaxial-Ligand-Shell Nanocrystal Photodetectors beyond 3 Mm Wavelength. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29 (14), 1–7. (B)
- [12] M. Abdu-Aguye, D. Bederak, S. Kahmann, N. Killilea, M. Sytnyk, W. Heiss, M. A. Loi, Photophysical and Electronic Properties of Bismuth-Perovskite Shelled Lead Sulfide Quantum Dots. *J. Chem. Phys.* 2019, 151 (21). (C)
- [13] 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)
- [14] 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. Kühncke; 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)

- [15] M. Daum, S. Deumel, M. Sytnyk, H. A. Afify, R. Hock, A. Eigen, B. Zhao, M. Halik, A. These, G. J. Matt, C. J. Brabec, S. F. Tedde, W. Heiss, Self-Healing  $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_{316}$  Perovskite Wafers for X-Ray Detection, *Adv. Funct. Mater.* 31, 2102713 (2021)
- [16] K. Kondo, Y. Watanabe, J. Kuno, Y. Ishii, S. Kawasaki, M. Kato, G. Kalita, Y. Hattori, O. Mashkov, M. Sytnyk, W. Heiss, Flexible Photocatalytic Electrode Using Graphene, Nonnoble Metal, and Organic Semiconductors for Hydrogen Evolution Reaction, *Energy Technol.*, 9, 2100123 (2021)
- [17] S. Deumel, A. van Breemen, G. Gelinck, B. Peeters, J. Maas, R. Verbeek, S. Shanmugam, H. Akkerman, E. Meulenkaamp, J. E. Hurdler, M. Acharya, M. García-Batlle, O. Almora, A. Guerrero, G. Garcia-Belmonte, W. Heiss, O. Schmidt, S. F. Tedde, High-sensitivity high-resolution X-ray imaging with soft-sintered metal halide perovskites, *Nature Electronics* 4, 681-688 (2021)
- [18] P. T. Prins, M. Alimoradi Jazi, N. A. Killilea, W. H. Evers, P. Geiregat, W. Heiss, A. J. Houtepen, C. Delerue, Z. Hens, D. Vanmaekelbergh, The Fine-Structure Constant as a Ruler for the Band-Edge Light Absorption Strength of Bulk and Quantum-Confined Semiconductors, *Nano Letters* (2021)
- [19] H. A. Afify, M. Sytnyk, S. Zhou, A. Osvet, C. J. Brabec, J. Korczak, A. Szczerbakow, T. Story, and W. Heiss, Perspectives of solution epitaxially grown defect tolerant lead-halide-perovskites and lead-chalcogenides, *Appl. Phys. Lett.* 119, 000000 (2021)

FORSCHUNGSBEREICH

# Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

**Prof. Dr. Matthias Luther**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

E-Mail  
[matthias.luther@fau.de](mailto:matthias.luther@fau.de)

Telefon  
+49 9131 / 85 67540

Web  
[www.encn.de/netze](http://www.encn.de/netze)

# Elektrische Netze

## Projektbericht 2017 - 2021

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

**Web**  
www.encn.de

# 1 Zentrum für Angewandte Simulationen am EnCN

## 1.1 Ganzheitlicher Ansatz der Stromnetzsimulation

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

Ziel der zukünftigen Forschung am EnCN ist es, Projekte zur Netzintegration ganzheitlich zu bearbeiten. Hierzu erfolgen am Standort des Lehrstuhls in Erlangen die klassischen Offline Simulationen im Bereich Elektromagnetischer und Elektromechanischer Komponenten sowie des Netzschutzes, während am Standort Nürnberg die Echtzeitsimulationen mit den dafür ausgelegten Laboren angesiedelt sind. Durch dieses aufeinander abgestimmte Zusammenspiel der Standorte, können über alle Spannungsebenen hinweg selbst energietechnische Großprojekte wissenschaftlich fundiert begleitet werden.

Kernkomponente des Laborkomplexes in Nürnberg sind digitale Echtzeitsimulatoren. 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 zulässig. Echtzeitsimulatoren bieten hier die Möglichkeit, in einer simulierten Umgebung reale Betriebsmittel, Inselnetze, Regelungssysteme, usw. wissenschaftlich fundiert zu untersuchen.

Abbildung 1 illustriert die Laborstruktur und die Anwendungsfelder. Im Wesentlichen klassifizieren sich die Anwendungen in Untersuchungen mit Leistungsaustausch (Power-Hardware-in-the-Loop, PHIL) und Untersuchungen ohne Leistungsaustausch (Hardware-in-the-Loop, HIL). Das PHIL und HIL Labor sind räumlich getrennt, die gesamte Kommunikation zu den Echtzeitsimulatoren allerdings über Lichtwellenleiter und das Aurora Protokoll umgesetzt. Das Laborkonzept ist hierbei modular, so dass je nach Aufgabenstellung die Labore über das Aurora-Protokoll gekoppelt werden oder unabhängig voneinander arbeiten. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Labore und Komponenten, sowie deren Einsatzmöglichkeiten vorgestellt.

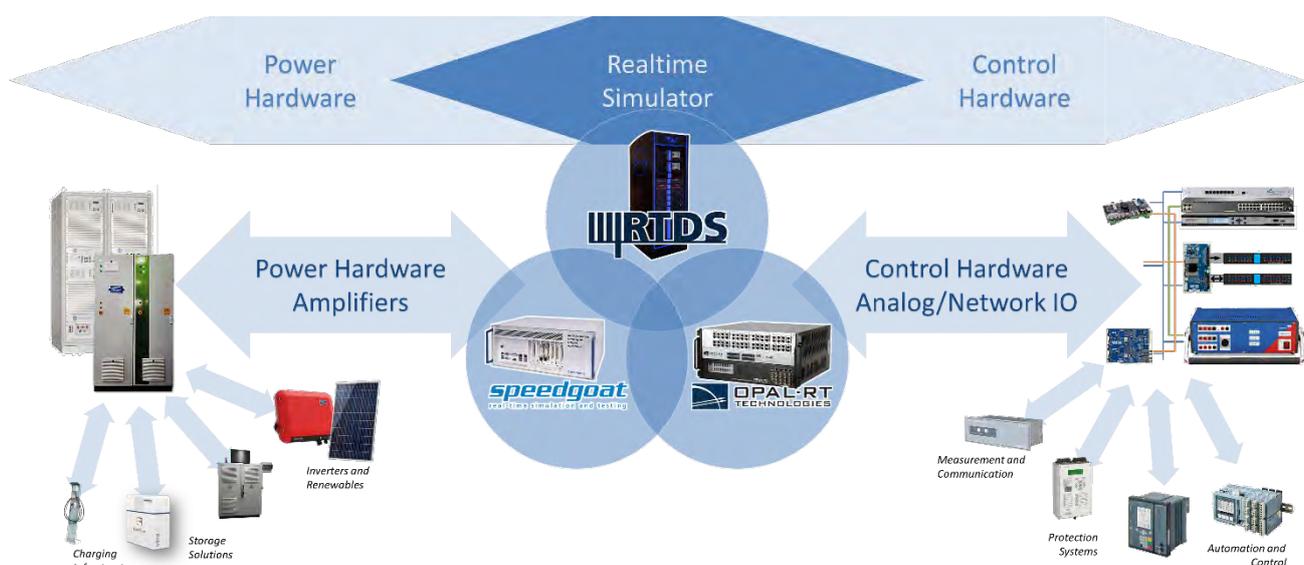


Abbildung 1: Überblick über das Laborkonzept

## 1.2 Hardware-in-the-Loop Netzsimulation

Abbildung 2 zeigt das HIL-Labor in dem auch die Echtzeitsimulatoren untergebracht sind. Auf der rechten Seite befinden sich vier HIL-Racks für Regelungs- und Schutzuntersuchungen. Im Hintergrund zu sehen ist der RTDS Simulator auf dem die elektrischen Netze und Betriebsmittel in Echtzeit simuliert werden.

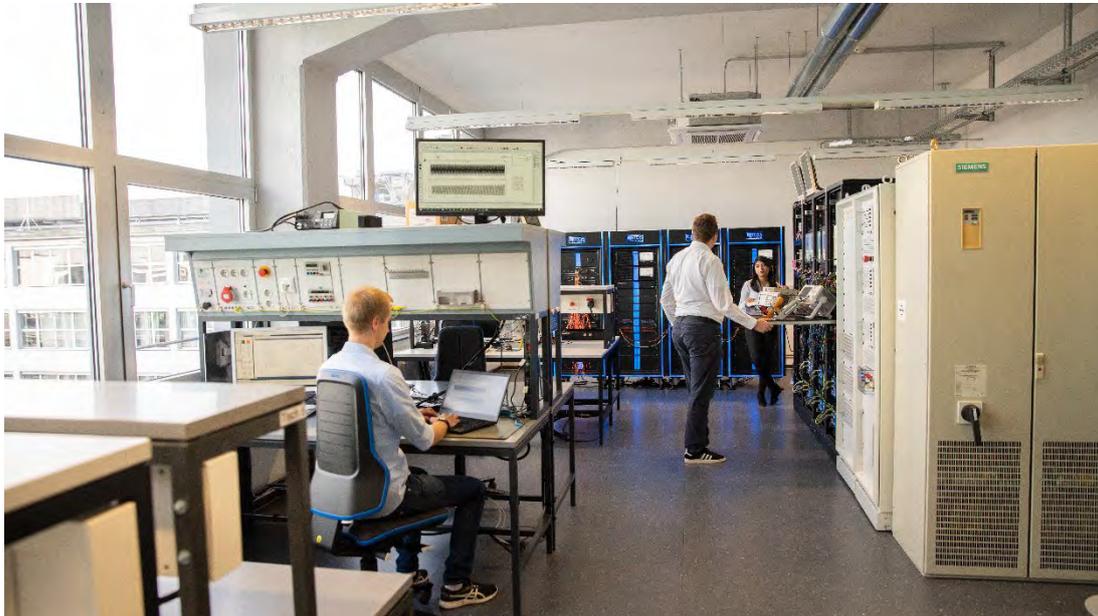


Abbildung 2: Kernkomponenten des HIL Labors (hinten RTDS Simulator, rechts CHIL Racks für Regelungs- und Schutzuntersuchungen)

Im Labor sind drei verschiedene Digitale Echtzeitsimulatoren im Einsatz, für unterschiedliche Anwendungen. Hinsichtlich der Leistungsklasse bildet der Digitale Echtzeitsimulator der Firma RTDS Technologies Inc. (Foto hinten) den Grundbaustein der gesamten Laborumgebung. Der Simulator basiert auf der Multicore-Verarbeitungsplattform NovaCor und ermöglicht die Simulation komplexerer Stromnetze in Echtzeit. Der installierte Simulator verfügt über E/A-Funktionen für den Anschluss realer Geräte. Mit mehr als 500 Kanälen für analoge und digitale Ein- und Ausgänge kann das Forschungsteam des LEES umfangreiche externe Schutz-, Steuer- oder Leistungsgeräte an das simulierte Netz anschließen. Umfangreiche Protokolle (z.B. IEC 61850), sowie ein leistungsstarker Satz von 12 GTFPGA-Einheiten (Abbildung 2 hinten mitte) runden den Simulator ab. Diese GTFPGA-Einheiten können besonders rechenintensive Komponenten oder Teilnetze simulieren. Laut Herstellerangaben handelt es sich im akademischen Bereich um eines der leistungsstärksten Systeme weltweit (<https://www.rtds.com/friedrich-alexander-university/>). Weitere installierte Systeme sind ein OP5707 von OPAL RT Technologies Inc. und ein Speedgoat System der Firma The MathWorks Inc. Klassisch arbeiten Echtzeitsimulatoren im Zeitbereich der Elektromagnetischen Transienten mit Zeitschritten von 50  $\mu$ s oder in Subnetzwerken zur Detailnachbildung von Leistungselektronik und deren Schalthandlungen auch deutlich kleineren Zeitschritten. Das Opal System bietet dagegen auch die Möglichkeit große Netze nur für den Zeitbereich Elektromechanischer Transienter zu simulieren. Die Simulationsschrittweite liegt hierbei im ms Bereich. Darüber hinaus eignet sich das System gut für die Entwicklung von Regelungen über Simulink und verfügt ebenfalls über E/A-Funktionen und Protokolle. Der Speedgoat Simulator dient nicht zur Modellierung elektrischer Netze und Betriebsmittel, sondern speziell als Real-Time-Target für die Regelungsentwicklung direkt in Simulink. Alle Simulatoren lassen sich über das Aurora-Protokoll miteinander koppeln oder mit den Leistungsumrichtern im PHIL-Labor.

### 1.2.1 Control-Hardware-in-the-Loop (CHIL)

Unter Control-Hardware-in-the-Loop (CHIL) versteht man die Untersuchung echter Anlagenregelungen oder deren Replika in simulierten Stromnetzen. Dies ist für Netzkonformitätsuntersuchungen wichtig, um festzustellen, ob sich die echte Regelung entsprechend der Netzanschlussregelungen des Netzbetreibers verhält. Darüber hinaus eignet sich das Labor auch für die Entwicklung und Auslegung neuer Regelungen. Insbesondere durch den Zubau umrichterbasierter

regenerativer Erzeugung, wird die Auslegung der zugehörigen Regelungen und die Untersuchung der Interoperabilität zwischen verschiedenen Betriebsmitteln immer wichtiger.

Abbildung 3 illustriert CHIL am Beispiel eines Microgrids. Das Microgrid ist hierbei auf dem RTDS nachgebildet, die Regelung des Microgrids ist komplett im Labor umgesetzt.

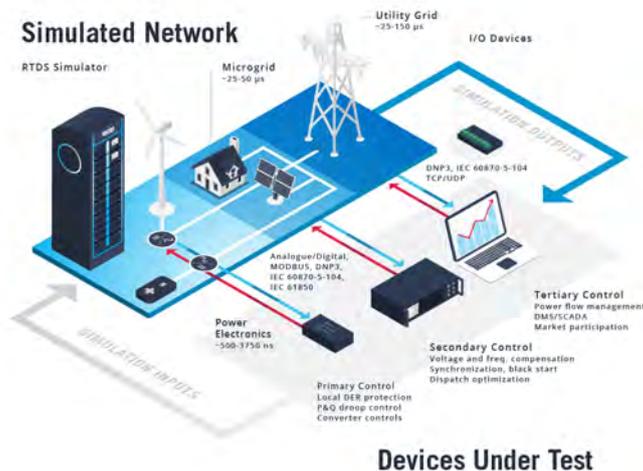


Abbildung 3: CHIL am Beispiel einer Regelung für Microgrids (Quelle RTDS Technologies Inc.)

Abbildung 4 zeigt das CHIL-Rack mit den Simulatoren von Speedgoat und Opal-RT, Abbildung 5 die zugehörige Rückseite mit der notwendigen Verkabelung um die Interoperabilität zu den übrigen Laborkomponenten sicherzustellen. Bestandteil des Racks sind die Echtzeitsimulatoren von OPAL-RT und Speedgoat auf denen Regelungen umgesetzt oder entwickelt werden können. Alternativ können auch Steuerschränke von Herstellern direkt in das Labor integriert werden. Über Lichtwellenleiter kommunizieren die Simulatoren und somit die hinterlegten Regelungen mit dem RTDS und den im dortigen Netz modellierten Betriebsmitteln. Darüber hinaus kann durch die Einbindung eines Leistungsumrichters aus dem PHIL-Labor auch ein Anlagenverhalten mit Leistungsflüssen nachgebildet werden. Ebenfalls in den HIL-Rack ist eine GPS-clock zur Zeitsynchronisation integriert.



Abbildung 4: Vorderseite des CHIL Racks mit den Simulatoren von Speedgoat und OPAL-RT



Abbildung 5: Rückseite des CHIL Racks mit den Simulatoren von Speedgoat und OPAL-RT

In dem Labor laufen aktuell beispielsweise Untersuchungen zu Netzbildenden Regelungen, Entwicklungen zu Microgrid Controllern, sowie Forschung im Bereich Co-Simulation und Digitaler Zwillinge.

### 1.2.2 Protection System Testing

Schutzgeräte nehmen eine Sonderstellung in den Stromnetzen ein, da nur diese als letzte Instanz automatisiert eine Abschaltung vornehmen dürfen, um größere Schäden zu vermeiden und Auswirkungen von Störfällen räumlich zu begrenzen. Mit der zunehmenden Komplexität des Stromnetzes, durch den Umbau zu einer CO<sub>2</sub> freien Stromversorgung, müssen die Schutzgeräte auf Relais Ebene, also hinsichtlich ihrer Algorithmen, immer intelligenter werden, aber auch hinsichtlich des systemischen Zusammenspiels untereinander. Weitergehende Ansätze verfolgen die Verzahnung von Netzschutz mit der Systemführung, die Entwicklung von Assistenzsystemen und Künstliche Intelligenz.

Analog zu Regelungen werden auch Schutzgeräte leistungslos, in auf dem RTDS Simulator modellierte Netze, integriert. Dies kann sowohl über Protokolle umgesetzt werden, als auch über die im Labor installierten sechs Messverstärker der Firma Omicron electronics GmbH. Durch Einbindung von Schutzgeräten in die Echtzeitsimulation kann das echte Geräteverhalten berücksichtigt werden. Insbesondere zeitliche Verzögerungen durch Wandler und die Schutzalgorithmen der Hersteller sind oftmals nicht bekannt und lassen sich daher in klassischen offline Simulationen nicht ausreichend darstellen. Darüber hinaus können in dem Labor, neu entwickelte Schutzalgorithmen getestet werden und hinsichtlich des Schutzverhalten hinsichtlich Netzdynamik und Topologieänderungen ausgewertet werden. Ebenso sind Untersuchungen zur Interoperabilität von Geräten verschiedener Hersteller möglich. Insgesamt existieren im Labor sechs Schutzgeräte, verteilt auf drei Racks (siehe Abbildung 2 rechts). Zusätzlich ließen sich auch Schutzalgorithmen auf dem Speedgoat System entwickeln, so dass dieses auch das Verhalten eines Schutzgeräts emuliert. Abbildung 6 zeigt Schutzuntersuchungen am Echtzeitsimulator.



Abbildung 6: Schutzuntersuchungen am Echtzeitsimulator

### 1.3 Power Hardware-in-the-Loop Netzsimulation

PHIL Untersuchungen sind wichtig, um das Verhalten von Erzeugern und Lasten vor deren Netzintegration für die verschiedensten Szenarien zu bewerten. Ausgehend von der Entwicklung eines Speichers und Microgrid Labors am EnCN (siehe Kapitel 1.3.1) wurde ein PHIL Labor aufgebaut, dessen Einsatzmöglichkeiten sich nicht auf Speicher und regenerative Erzeuger beschränken, sondern sich auf beliebige Erzeuger und Lasten erweitern lässt, also beispielsweise auch Motoren und Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Abbildung 7 zeigt das Prinzipschaltbild einer PHIL Simulation. Um den Digitalen Echtzeitsimulator von den Strömen und Spannungen der physikalischen Anlagen zu entkoppeln sind sogenannte Leistungsumrichter notwendig. Diese bilden physikalisch den Netzanschlusspunkt einer Anlage aus der

Simulation ab und speisen die Leistung der Anlage unter Einhaltung aller Normen zur Power Quality in das öffentliche Stromnetz. Die Leistungsumrichter des PHIL Labors sind über das Aurora Protokoll mit den Echtzeitsimulatoren im HIL Labor gekoppelt.

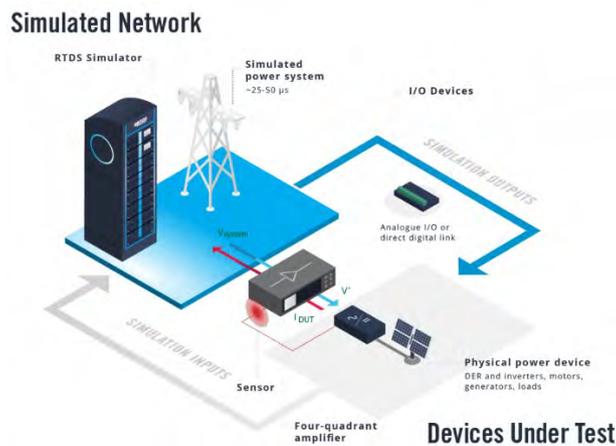


Abbildung 7: PHIL am Beispiel einer PV-Anlage (Quelle RTDS Technologies Inc.)

### 1.3.1 Speicherlabor und Microgrid ENGiNe

Unter einem Mikronetz versteht man einen lokalen Verbund aus dezentralen (meist regenerativen) Energiesystemen, und Lasten, welche für eine bessere Ausnutzung durch Speicher ergänzt werden. Über eine eigene Steuer- und Regeleinheit werden Mikronetze im ökonomisch und ökologisch optimalen Betriebspunkt gehalten und können dabei synchron mit dem öffentlichen Netz oder im Inselnetzmodus betrieben werden. Mit der zunehmenden Verbreitung regenerativer Energiesysteme, Speicher und IKT im Verteilnetz können wesentliche Betriebskonzepte für Mikronetz auch auf das Verteilnetz zur Zukunft angewendet werden. In den Laborräumen des EnCN hat der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) daher eine Forschungsanlage aufgebaut, das Mikronetz-, Energiespeicher- und PHIL-Labor *ENGiNe*. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau des Labors.

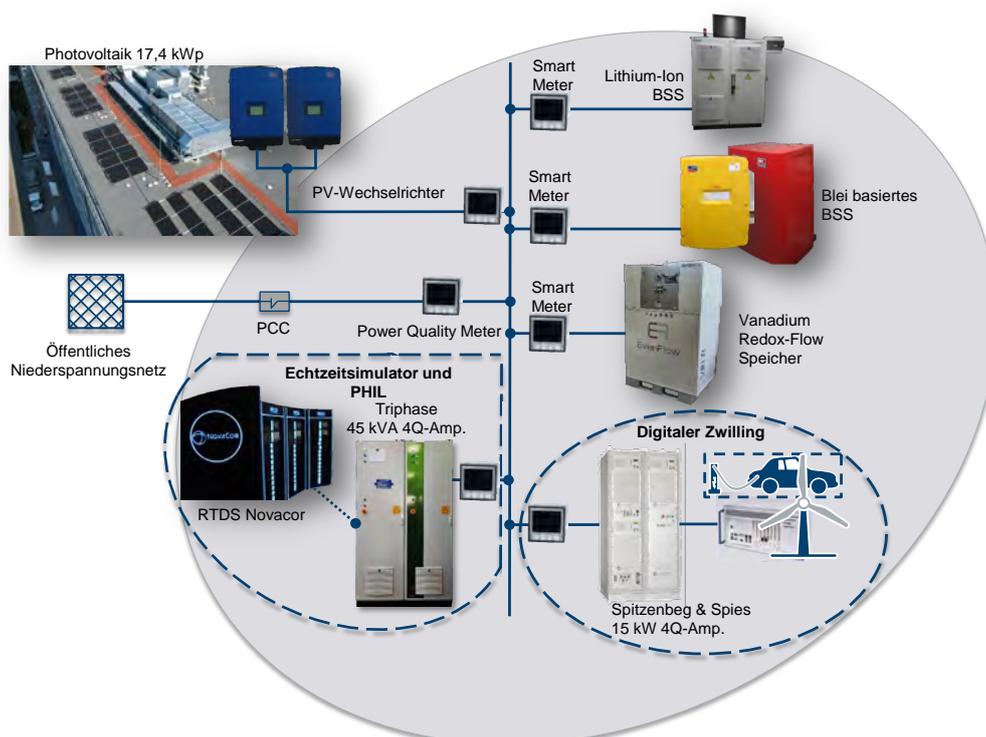


Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Mikronetzes (BSS = Batteriespeichersystem)

Durch den flexiblen Aufbau des Labors ergibt sich ein breites Feld an Untersuchungsmöglichkeiten in den Bereichen regenerative Energiesysteme, Energiespeicher, Mikronetze und Digitalisierungsanwendungen. Der Laboraufbau ermöglicht die Untersuchung des Zusammenspiels unterschiedlicher Betriebsmittel des Niederspannungsnetzes. Als regenerative Einspeisung des Reallabors steht eine 17-kWp-Photovoltaikanlage auf den Dachflächen des EnCN zur Verfügung (siehe Abbildung 9). Den Kern des Mikronetzes bilden mehrere Speichersysteme auf Blei-, Redox-Flow- und Lithiumbasis mit Speicherkapazitäten im Bereich von jeweils mehreren Kilowattstunden.



*Abbildung 9: Die Photovoltaikanlage des LEES als integraler Bestandteil des Mikronetzaufbaus auf dem Dach des EnCN*

Das Labor ist integraler Bestandteil des Zentrums für Angewandte Simulationen am EnCN und über eine Lichtwellenleiterverbindung mit den Netzsimulatoren des Echtzeitlabors gekoppelt. Dadurch können die real vorhandene Betriebsmittel *ENGiNe*-Labor durch simulative Komponenten über eine Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Simulation ergänzt werden. Die Echtzeitsimulatoren simulieren dabei virtuelle Betriebsmittel, Netzkomponenten oder ganze Netzausschnitte welche über einen hochdynamischen Leistungsverstärker von Triphase N.V. mit dem realen Laboraufbau verbunden werden. Dies bietet die Möglichkeit, dem realen Mikronetz virtuelle Anlagenkomponenten (beispielsweise weitere Speichersysteme oder regenerative Energieanlagen) hinzuzufügen oder als Netzsimulator zu fungieren, um auch Betriebsituationen zu testen, die im realen Netz nur unvorhersehbar eintreten. Ein linearer Leistungsumrichter von Spitzenberger & Spies dient als zusätzliche Flexibilität im Labor. Durch Kopplung des Leistungsumrichters mit einem Real-Time-Target (z.B. Speedgoat) lassen sich, zusätzlich zum Triphase Verstärker, Digitale Zwillinge in die Laborumgebung integrieren. Diese können separat untersucht werden oder ermöglichen die Erweiterung des Labors um regelbare Lasten und Erzeuger (z.B. Ladesäulen, Kleinwindanlagen, Brennstoffzellen). Der Vorteil des Spitzenberger & Spies Umrichters ist hierbei sein hoher Frequenzbereich von DC bis 30 kHz und die Erfüllung der IEC/EN 61000-4-11 für normgerechtes Prüfen elektrischer Betriebsmittel im Bereich Power Quality.

Auf diese Weise können neuartige Betriebsmittel bereits in einem frühen Entwicklungsstadium in einer realitätsgetreuen Umgebung auf deren Funktion getestet werden oder das Zusammenspiel ganzer Anlageneinheiten in einem Mikronetz mit reproduzierbaren Ergebnissen untersucht werden.

Im Fokus der Untersuchungen im *ENGiNe*-Labor steht dabei die Weiterentwicklung von Regelkonzepten für Verteil- und Mikronetze, sowohl auf Anlagen, als auch auf Verbundebene. Für einen möglichst ausfallsicheren Betrieb wurden die Betriebsstrategien daher auf Industriestandards basierender Hardware entwickelt und im realen Laborumfeld getestet. Die Prozessoreinheit des Microgrid-Controllers stellt eine kommunikative Verbindung zu allen Anlagen her, um Sollwerte vorzugeben und Messwerte auszuwerten (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Das Mikronetz ENGiNe am EnCN wird über einen zentralen Microgrid-Controller geregelt

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 auch 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.

### 1.3.2 Smart renewable Power Plant

Regenerative Energiesysteme werden überwiegend über Umrichter in die Verteilnetze integriert. Diese Einspeisungen über Umrichter bringen eine neue Dynamik in das bestehende Elektroenergiesystem. Um diese Effekte in einem realen Umfeld zu studieren, hat der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme in Zusammenarbeit mit der SIEMENS AG das Smart renewable Power Plant (SrPP) aufgebaut. Nachdem das SrPP zunächst bei SIEMENS in Betrieb genommen wurde, ist es 2019 vollständig in den Besitz des LEES übergegangen und im Zuge dessen in das PHIL Labor auf dem EnCN integriert worden.

Bei dem SrPP sind zwei Umrichter parallel an das ENGiNe-Netz angeschlossen. Auf der DC-Seite des Aufbaus ist zusätzlich ein Lithium-Ionen Batteriespeicher der Firma Saft Batterien GmbH über einen DC-DC Wandler angeschlossen. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 11 dargestellt. Der linke Umrichter ist hierbei als selbstgeführter 2-Level-Umrichter (2VSC) mit einer maximalen Leistungsfähigkeit von 70 kVA realisiert. Bei dem zweiten Umrichter handelt es sich um einen Modularer Multilevel-Umrichter (MMC) mit einer Maximalleistung von 25 kVA. Der Unterschied zwischen den beiden Umrichtern liegt darin, dass im MMC mehr leistungselektronische Submodule zur besseren Darstellung des Sinussignals der AC-Spannung verbaut sind. Ein Alleinstellungsmerkmal des MMC im SrPP sind acht LG-Batterien, die in der dritten Phase an den einzelnen Submodulen zusätzlich angeschlossen sind. Hierdurch wird die Zwischenkreiskapazität erheblich vergrößert und bietet so zusätzliche Optionen im Betrieb der Anlage. Für den Betrieb der beiden Umrichter wurden verschiedene Regelungen entwickelt. Diese unterscheiden sich in netzfolgende und netzbildende Regelungen, deren Einsatz abhängig vom Zustand sich des Netzes ist. Zusätzlich können die beiden Umrichter eine virtuelle Trägheit in das Netz einprägen. Somit kann das Verhalten einer Synchronmaschine zur Stabilisierung des Netzes emuliert werden. Der Batteriespeicher kann aufgrund seiner Bidirektionalität als Last und als Einspeisung fungieren. Durch die schnellen Reaktionszeiten können die Einspeisepprofile verschiedener regenerativer Energiesysteme abgebildet werden, was dem Versuchsaufbau seinen Namen gegeben hat.

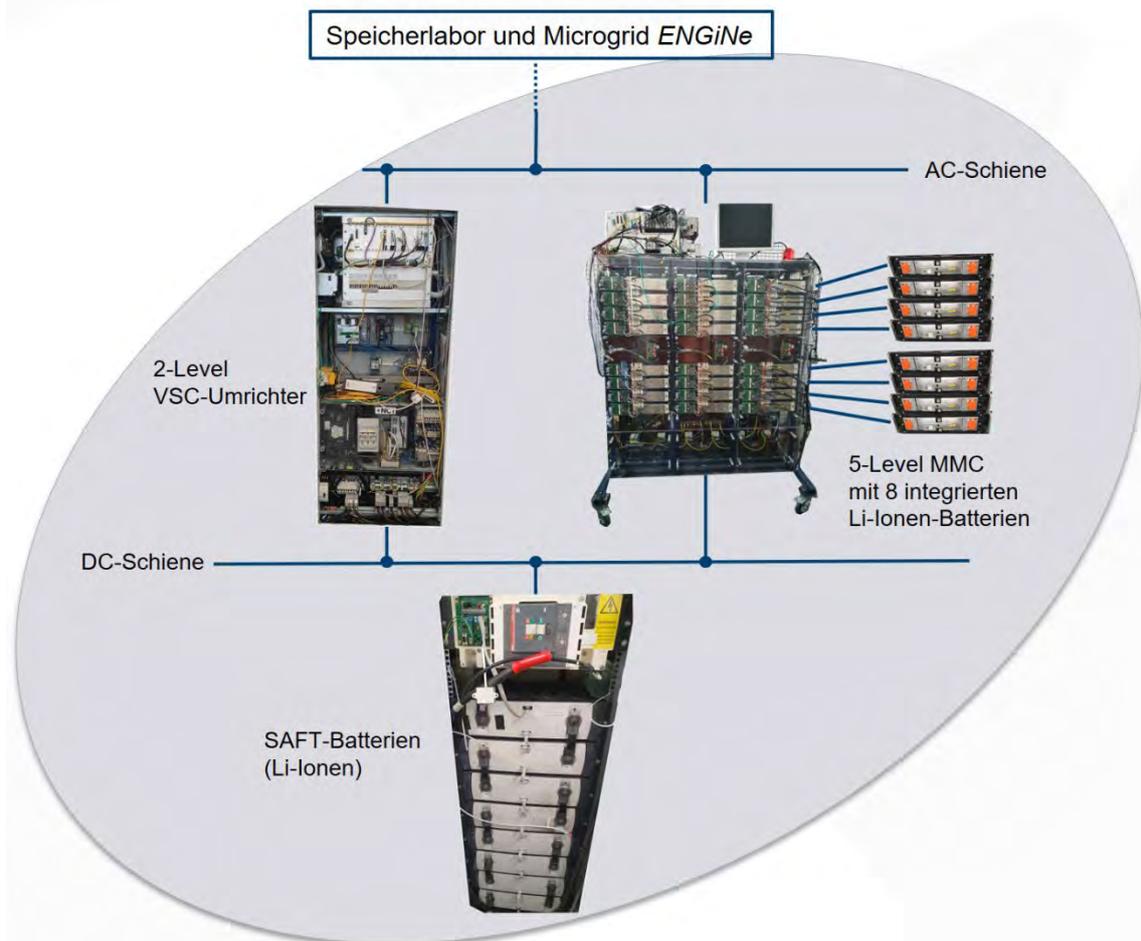


Abbildung 11: Anlagenschema des Smart renewable Power Plan

## 2 Projekte

Der Bereich Netze war von 2016 bis 2021 mit mehreren Projekten am EnCN vertreten. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Drittmittelprojekte. Schwerpunktmäßig liegen die Tätigkeiten am EnCN im Bereich der Systemstabilität (TPJ1: Prof. Matthias Luther) und des Netzschutzes (TPJ2: Prof. Johann Jäger). Somit leistet der EnCN einen Beitrag zum Erhalt der Versorgungssicherheit in Deutschland.

Aufgrund einer stetigen Zunahme der Komplexität elektrischer Energieversorgungsnetze, sind Analyse- und Bewertungsstrategien sowie Verbesserungsmaßnahmen zum Erhalt der Systemstabilität und Schutzsicherheit von entscheidender Bedeutung. In den Verbundprojekten **InnoSys 2030** ([link](#)) und **Netz:Kraft** ([link](#)) standen derartige Fragestellungen im Fokus. Hierzu wurde in den Projekten sowohl mit Netzbetreibern, Herstellern als auch akademischen Partnern eng zusammengearbeitet. Die Förderung erfolgte durch das BMWi. Im Projekt InnoSys lag der Fokus auf einer höheren Netzauslastung durch innovative Systemführung bei gleichbleibender Versorgungssicherheit. Im Projekt Netz:Kraft wurden neue Konzepte für den Netzwiederaufbau bei zukünftigen Kraftwerkstrukturen erarbeitet.

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

größtechnischen Demonstrationsprojekt. Derzeit läuft die zweite Förderphase des Verbundprojekts. Die Förderung erfolgt durch das BMBF.

Darüber hinaus wurden im Berichtszeitraum zwei Projekte zur **Echtzeit Co-Simulation** umgesetzt. Eines der Projekte wurde gefördert durch die Bayerische Forschungsstiftung, das andere ist ein reines Industrieprojekt. Im Projekt **Demonstrator zur RMS-EMT Netzkopplung in Echtzeit**, bei der Bayerischen Forschungsstiftung, wurde hierbei sehr eng mit der Firma OPAL-RT Germany GmbH (KMU mit Sitz in Nürnberg) zusammengearbeitet. OPAL-RT Germany ist ein Tochterunternehmen von OPAL-RT Inc., einer der weltweit führenden Hersteller von Echtzeitsimulatoren für Stromnetzsimulationen.

Im Bereich der Speicherforschung ist das Projekt **SWARM – Storage With Amply Redundant Megawatt** hervorzuheben. In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik war es Ziel des Projekts, sowohl ökonomische Untersuchungen für vernetzte Heimspeichersysteme durchzuführen, als auch Analysen der Netzdienlichkeit betreffend zu erstellen.

---

### 3 Schlussworte

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

---

### 4 Vorträge & Poster 2017 – 2021

- [1] Jungnickel, F.; Mehlmann, G.; Langwasser, M.; Kühnapfel, U.: Co-Simulation Test Bench for Grid Integration of Power Electronics under Usage of Power Hardware in the Loop. IEEE Energy Conversion Conference and Expo, Vancouver, 2021
- [2] S. Resch. Real time simulation for PHIL applications in a microgrid testbed. RTDS Technologies User Spotlight Series, 2020.
- [3] 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.
- [4] R. Dimitrovski. Enhanced Multi-mass Model in RSCAD. RTDS Technologies User Spotlight Series, 2020.
- [5] A. Raab, C. Scheibe. Co-Simulation zwischen PSS®NETOMAC und Simulink. PSS NETOMAC Virtual User Forum 12/2020. Erlangen, DE, 2020

---

### 5 Veröffentlichungen 2017 – 2021

- [6] A. Raab, C. Scheibe, A. Wellhoefer, T. Nguyen, D. Frauenknecht, G. Mehlmann: Converter-based Control using Co-Simulation with a Power System Simulation Tool, In Neis 2021 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 2021

- [7] A. Raab, D. Frauenknecht, D. Riebesel, G. Mehlmann, M. Luther: Adaptive Power Control of VSC-HVDC as A Corrective Measure, In International Conference on Power and Energy Applications, Busan, South Korea, 2021
- [8] A. Raab, G. Mehlmann, J. Schindler, M. Luther, M. Abel, S. Horn, C. Heyde, P. Wiest, R. Krebs, A. Kubis: Security Assessment for higher loaded power system operation to 2030. In Proceedings of the ETG-Kongress 2021 - Von Komponenten bis zum Gesamtsystem für die Energiewende (pp. 6). ETG-Kongress 2021. Berlin. Offenbach: ©VDE VERLAG GMBH, 2021
- [9] A. Raab, T. Sennewald, G. Mehlmann, S. Schlegel, M. Luther, D. Westermann: Steady-State and Dynamic Security Assessment for System Operation. In 2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Vaasa, Finland, 2021
- [10] A. Kuri, R. Zurowski, G. Mehlmann, D. Audring, M. Luther: A novel Grid Forming Control Scheme revealing a True Inertia Principle. IEEE Transactions on Power Systems. <https://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3071126>, 2021
- [11] M. Sukumaran, A. Kuri, G. Mehlmann, M. Luther: Modular Controller Design applied to Network Reduction Suited for Offline and Online Simulation. In 56th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2021, Teesside University, UK, 2021
- [12] A. Kuri, X. Zhou, G. Mehlmann, P. La Seta, M. Luther: Dynamic model reduction based on coherency and genetic optimization methodology. In Proceedings of the ETG-Kongress 2021 - Von Komponenten bis zum Gesamtsystem für die Energiewende (pp. 6). ETG-Kongress 2021. Berlin. Offenbach: ©VDE VERLAG GMBH, 2021
- [13] G. J. Meyer, J. Jaeger, C. Romeis, L. Shang-Jäger, M. Dauer, and R. Krebs, "Protection Toolchain: Automatisierte Erstellung netzintegrierter und adaptiver Schutzkonzepte," VDE ETG Kongress 2021, Online, May 2021.
- [14] G. J. Meyer, J. Jaeger, C. Romeis, L. Shang-Jäger, M. Dauer, and R. Krebs, "Protection Toolchain: Automated Generation of Adaptive Grid Protection Concepts," 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Online, June 2021.
- [15] G. J. Meyer and J. Jaeger, "Window Evaluation – A new Technic for Stability Security Security Assessment in Dynamic Protection Simulations," 9th International Conference on Advanced Power System Automation & Protection, Jeju, Republic of Korea, Oct. 2021.
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] G. J. Meyer, I. Dimopoulos, and J. Jaeger, "System-based Fault Locator Based on a Pattern Recognition Approach," in 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Jul. 2020
- [22] G. J. Meyer and J. Jaeger, "Systemweite Fehlerortbestimmung basierend auf einem Mustererkennungsansatz," 11. ETG/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik, Berlin, Feb. 2020
- [23] M. Richter; G. Mehlmann; M. Luther, Grid Code Compliant Modeling and Control of Modular Multilevel Converters during Unbalanced Faults. UPEC 2019, Bukarest, 2019.
- [24] G. J. Meyer *et al.*, Digital System Protection Design – A new Toolchain for Protection System Automation. CIRED International Conference on Electricity Distribution, Madrid, 2019
- [25] R. Dimitrovski *et al.*, Comprehensive computer program for SSTI analysis of AC/DC power systems based on the component connection method, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 2019
- [26] S. Resch, S. Och, M. Luther. Conception, Modelling Approach and Practical Implementation of a Hybrid Laboratory-Based Microgrid. NEIS-Konferenz, Hamburg, 2018
- [27] R. Dimitrovski *et al.*, Analyzing Subsynchronous Resonance Using Component Connection Method. IEEE PES GM, Portland, 2018.

- [28] Meyer G. J.; Jäger J. Protection Security Assessment during Fault and Post-Fault phase, IEEE PES General Meeting in Portland, Oregon, USA, August 2018
- [29] Meyer G. J.; Romeis C.; Jäger J. Automatisierte Bewertung der Schutzsicherheit unter Berücksichtigung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge in Hochspannungsnetzen ETG/FNN Fachtagung Schutz- und Leittechnik in Berlin; Februar 2018
- [30] Meyer G. J., Dauer M., Jäger J. Flexible Schutzbewertung für multivariate Netze anhand fuzziverzierter Einstellparameter des Distanzschutzes, ETG-CIRED-Workshop 2018, Berlin, Germany, November 2018
- [31] M. Jaworski; M. Retterath; J. Jäger. The Proactive Protection System – An Approach to avoid Cascading Line Tripping. APAP, 2017
- [32] M. Jaworski; E. Schischke; J. Jäger. Modelling of the Sympathetic Inrush Effect and Its Impact on Protection Systems during Power System Restoration. PAC World, 2017
- [33] K. Veerashekar; S. Weiß; M. Luther. Frequency Regulation in Transmission Grids Using Virtually Interconnected Battery Storage Systems. CIGRE Symposium, Dublin, 2017
- [34] K. Veerashekar; C. Mitterreiter; M. Luther. Probabilistic Load-Flow Analyses in Distribution Grids with Battery Storage Systems Providing Frequency Containment Reserve. CIGRE Symposium, Dublin, 2017
- [35] R. German; K. Goetz; V. Grimm; A. Kufner; C. Leepa; M. Luther; S. Mehl; I. Sigert; D. Steber; K. Veerashekar. Virtueller Großspeicher zur Erbringung von Primärregelleistung - Pilotprojekt SWARM. OTTI-Konferenz, Berlin, 2017

FORSCHUNGSBEREICH

# Speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail  
[juergen.karl@fau.de](mailto:juergen.karl@fau.de)

Telefon  
+49 911 / 5302 99021

Web  
[www.encn.de/speicher](http://www.encn.de/speicher)



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail  
[peter.wasserscheid@fau.de](mailto:peter.wasserscheid@fau.de)

Telefon  
+49 9131 / 85 27420

Web  
[www.encn.de/speicher](http://www.encn.de/speicher)

# Speicher A

## Projektbericht 2017 - 2021

Der Projektteil „Speicher mit Systemrelevanz bis 2022“ fokussierte sich 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  $\text{GW}_{\text{el}}$
- 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.

Nachdem viele der theoretischen Betrachtungen bereits in den Vorjahren abgeschlossen wurden, war das letzte Projektjahr 2021 stark von den experimentellen Arbeiten im „Speicherhaus“ geprägt. Die Einschränkung aufgrund der Corona-Pandemie führten hierbei wie in den Vorjahren berichtet zu Verzögerungen bei den Inbetriebnahmen der Anlagen, welche jedoch im Jahr 2021 weitestgehend aufgeholt werden konnten. Schließlich konnte im letzten Schritt sowohl die Energiespeicherung in der reversible 20  $\text{kW}_{\text{el}}$  HP-ORC Anlage mit dem zugehörigen Niedertemperatur-Speicher (SP1) sowie im Hochtemperatur-Carbonatspeicher (SP2) erfolgreich demonstriert werden. Mit Ablauf der Förderphase des EnCN wurden somit alle wissenschaftlichen und technischen Ziele erreicht, wengleich die beantragte mittelnutrale Projektverlängerung nochmals für vertiefte Messkampagnen und die Dissemination der Ergebnisse genutzt werden soll.

### KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR  
**Prof. Dr. Jürgen Karl**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg



**E-Mail**

Juergen.karl@fau.de

**Telefon**

+49 911 5302 99021

**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)*

Um bei der Bereitstellung elektrischer Energie auftretende Überschüsse flexibel, kurzfristig und dezentral zu speichern, kann günstig eine Wärmepumpe eingesetzt werden, welche Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau bringt und diese dort einem Energiespeicher zuführt. Im Strombedarfsfall kann durch die Umkehrung des Prozesses in Form eines Organic Rankine Cycle (ORC) die auf hohem Temperaturniveau gespeicherte Energie wieder zurückverstromt werden. Durch die Aufwertung von Niedertemperaturabwärme wird die Effizienz des Prozesses zusätzlich verbessert. Indem die Komponenten sowohl für Belade- als auch Entladevorgänge genutzt werden, können die Investitionskosten der Anlage signifikant reduziert werden.

Zur Erzielung eines optimalen Power-to-Power- (P2P-) Wirkungsgrades bei der Speicherung der elektrischen Energie sind die Gestaltung des Kreisprozesses und die Wahl des Arbeitsfluides von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) detaillierte Simulationsmodelle in Matlab® entwickelt. Die erstellten Modelle erlauben es, verschiedenste Systemkonfigurationen zu testen, darunter mögliche Schaltungskonzepte mit ein-

oder zweistufiger Anlagenkonzeption, alle von der umfassenden thermodynamischen Stoffdatenbank REFPROP bereitgestellten Reinstoffe sowie sub- und transkritische Prozessführungen. Daraus ergeben sich über 1250 Varianten. Diese wurden auf ihre allgemeine Eignung geprüft, mittels einer Parametervariation der Randbedingungen optimiert und in enger Zusammenarbeit mit den aktuellen Ergebnissen und Anforderungen des Projektpartners iPAT verfeinert. Als besonders geeignete Arbeitsfluide wurden Cyclopentan, R365mfc, Novec649 und R1233zd identifiziert.

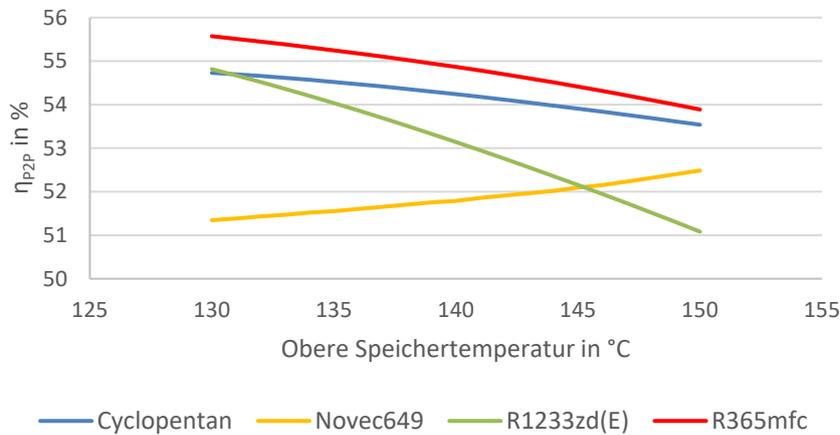


Abbildung 1: Power-to-Power-Wirkungsgrad in Abhängigkeit der oberen Speichertemperatur bei konstantem Speicherhub von 40 °C

Für diese Arbeitsfluide wurden zahlreicher Detailsimulationen durchgeführt, bei denen eine Reihe wesentlicher Parameter variiert wurden, vgl. Abbildung 1. Besonderes Augenmerk kam der Verwendung eines latenten bzw. sensiblen thermischen Speichers zu. Beide Speicherarten zeigen spezifische Vor- und Nachteile, so dass im Einzelfall eine sorgfältige Abwägung unter Einbeziehung der konkreten Randbedingungen des Betriebs getroffen werden muss (vgl. Eppinger et al., Appl. Energy, 2020). Charakteristische Arbeitsdiagramme unter Nutzung unterschiedlicher Speicher sind in Abbildung 2 gezeigt.

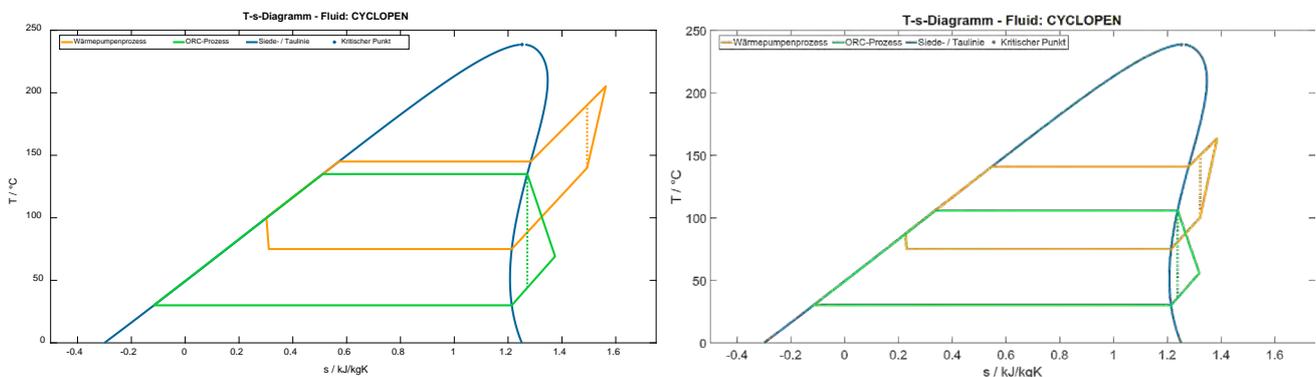


Abbildung 2: T,s-Diagramme für Wärmepumpen- (orange) und ORC- (grün)-Prozess bei Nutzung eines latenten (links) und sensiblen (rechts) Speichers

Die Untersuchungen der HP-ORC-Systeme wurden um eine Betrachtung zunächst des stationären Teillastverhalten und schließlich auch um eine dynamische Simulation der Teilprozesse erweitert. Diese hat u.a. die Erprobung von Regelungsstrategien für ein verbessertes Anfahrverhalten ermöglicht. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte z.B. die notwendige Leistung einer Zusatzbeheizung für die Unterstützung des Anfahrvorganges der Wärmepumpe und zur Verkürzung deren Anlaufzeit ermittelt werden.

Neben der thermodynamischen Betrachtung der Kreisprozesse wurden auch wirtschaftliche Aspekte der Prozesse untersucht. Für die wirtschaftliche Bewertung und Vergleichbarkeit der Speicherkosten wurde 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 zeigte 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. Bei einer angenommenen Anlagenlebensdauer von 20 Jahren konnten ohne Berücksichtigung von Skalierungseffekten bereits 23 ct/kWh als LCOS erreicht werden. 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.

Die im Projekt durchgeführten Simulationsarbeiten führten zu zahlreichen Synergien zu anderen Teilprojekten am EnCN. So bildete die Simulation eine wesentliche Basis für den Anlagenbau am Lehrstuhl iPAT, durch den die Prozesse in eine Prototypanlage im Labormaßstab umgesetzt wurden (vgl. Eppinger et al., Applied Energy, 2021). Durch detaillierte Teillastsimulationen, ergänzt um durch Standzeiten bedingte Abkühlungen des thermischen Speichers, konnte das Konzept eines thermischen Speichers für ein praxisnahes Anwendungsszenario genutzt werden. In Kooperation mit dem Lehrstuhl INF7 wurde eine zeitaufgelöste Simulation für kleinskalige Anwendungen wie in diesem Fall einer 40-Häuser-Siedlung eingesetzt (vgl. Eppinger et al., Energies 2021).

Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden insgesamt 4 Bachelor-, 7 Master- sowie 3 Projektarbeiten erfolgreich abgeschlossen, sodass hier auch Studierende die Möglichkeit erhielten, an höchst aktuellen Forschungsthemen mitzuwirken. Wesentliche Themenstellungen betrafen u.a. die Fluidauswahl und die Erarbeitung von Designregeln für die Abstimmung der drei involvierten Prozesse aufeinander. Der Erfolg des Projektes Speicher A konnte zudem in einem Abschlussworkshop im September 2021 einem breiten Publikum aus Industrie und Wissenschaft demonstriert werden. Insgesamt zehn Redner trafen hierbei auf 113 Teilnehmerinnen und Teilnehmer und konnten sich einen Tag lang über die involvierten Technologien, wirtschaftlichen Potenziale und politischen Randbedingungen austauschen.

## 1.2 Aufbau und Demonstration einer 20 kW<sub>el</sub> HP-ORC Anlage

*Daniel Steger, Eberhard Schlücker (iPAT)*

Zur Validierung des Speicherkonzepts basierend auf einer reversiblen HP-ORC-Anlage und einem Heißwasserspeicher, soll eine Pilotanlage im Maßstab von ca. 20 kW<sub>el</sub> aufgebaut und erprobt werden. Da eine solche Anlage aktuell nicht marktverfügbar ist, erfolgte die gesamte Planung und der Aufbau am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik.

Sowohl im ORC-Prozess, also auch im Wärmepumpen-Prozess stellen die Verdrängermaschine und die Wärmetauscher die zentralen Elemente einer Anlage dar. Aufgrund dessen stand die Marktrecherche zu geeigneten Verdrängermaschinen und die Auslegung der Wärmetauscher im Projektjahr 2017 im Vordergrund. Für die Vorgabe des Umkehrbetriebs scheint die Bauform der Schraubenmaschine am besten geeignet zu sein. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Auswahl der Maschine von einigen weiteren Parametern abhängt und auf die Festlegung dieser in ähnlichem Maße Einfluss nimmt. So wirken sich beispielsweise die Auswahl des Arbeitsfluides und die Betriebsweise (Temperaturniveaus, Massenstrom, etc.) stark auf das Design der Schraubenmaschine und auch der Wärmetauscher aus. Deshalb wurde die Marktrecherche auch auf das Gebiet der Arbeitsfluide ausgedehnt.



*Abbildung 3: Tribometer zur Bestimmung des Reib- und Verschleißkoeffizienten (links) sowie Kapillar-Viskosimeter zur Bestimmung der Viskositäts-Temperatur-Charakteristik (rechts) von Arbeitsfluid-Schmieröl-Paarungen*

Im Gespräch mit den Herstellern der Arbeitsfluide und der Schraubenmaschinen hat sich herausgestellt, dass der Schmierstoff einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Verhalten des Arbeitsfluides hat. Es ist beispielsweise darauf zu achten, dass die Viskosität des Schmierstoffes nicht unter einen unteren Grenzwert sinkt, da sonst die Schmiereigenschaften nicht mehr gewährleistet werden können. Dies kann der Fall sein bei besonders hohen Temperaturen oder aber auch durch den Einfluss des Arbeitsfluides. Um diesen Sachverhalt näher zu betrachten, wurde an Versuchsanlagen die Viskositäts-Temperatur-Charakteristik sowie der Reib- und Verschleißkoeffizient verschiedener Arbeitsfluid-Schmierstoff-Paarungen studiert (siehe Abbildung 3). Zusätzlich ist bei der Auswahl der Arbeitsfluide und der Schmieröle die Mischbarkeit und Brennbarkeit entscheidend, was für unterschiedliche Paarungen untersucht wurde. Diese Ergebnisse haben, neben den rechnergestützten Untersuchungen am LTT, zur Auswahl der Fluide beigetragen.

Das Projektjahr 2018 war geprägt von der Detail- und Aufstellungsplanung der Pilotanlage. Hierzu wurden zunächst in enger Abstimmung mit den Projektpartnern die Rahmenbedingungen der Versuchsanlage in einem Design Freeze festgelegt. Es waren dabei vor allem die (obere und untere) Speichertemperatur und das Arbeitsfluid kritische Parameter, die intensiv diskutiert wurden. So zeigte sich beispielsweise, dass sich die Speicherkapazität und der Gesamtwirkungsgrad – beides wichtige Zielgrößen in der Prozessauslegung – nicht unabhängig voneinander optimieren lassen. Aufgrund dessen wurde ein Kompromiss festgelegt, der eine sinnvollen Speicherkapazität bei einem guten Gesamtwirkungsgrad ermöglicht. Bei der Festlegung des Arbeitsfluids für den Prozess spielten neben den Ergebnissen aus der Prozesssimulation auch umweltrelevante Faktoren (Global Warming Potential, Ozone Depletion Potential) und kostenrelevante Faktoren (benötigte Menge, Beschaffungspreis) eine wichtige Rolle. Das Ergebnis des Design Freeze und somit die Grundlage der weiteren Anlagenplanung ist schließlich die Festlegung der Speichertemperaturen auf 90°C und 120°C und die Wahl des Arbeitsfluids R1233zd. Aufbauend darauf erfolgte nun die Festlegung der verschiedenen Anlagenkomponenten (Wärmeübertrager, Pumpen, Ventile, Verdichter und Expander), die nach enger Absprache mit den Herstellern geschah. Mit Hilfe einer CAD-Software wurden die Komponenten in mehreren Revisionen in einem Anlagenmodell positioniert, bis schließlich der optimale Aufbau gefunden wurde (siehe Abbildung 4). Die Rohrleitungsplanung erfolgte nach den einschlägigen Normen und es wurde ein Sicherheitskonzept erstellt.

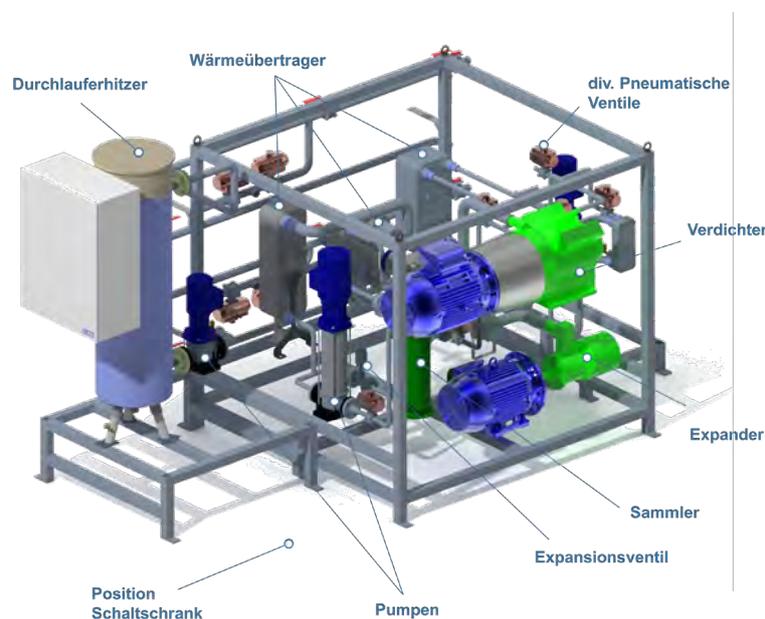


Abbildung 4: CAD-Zeichnung der HP-ORC-Pilotanlage

Bis Ende des Jahres 2018 konnten alle großen Komponenten der Anlage bestellt werden, die Lieferung erfolgte mehrheitlich auch bereits bis zum Ende des Jahres 2018. Mit Beginn des Jahres 2019 startete der Aufbau der Anlage sowie die Programmierung der notwendigen Leittechnik.

Im Projektjahr 2019 wurde an der Fortsetzung der Planung und dem Aufbau der HP-ORC Pilotanlage gearbeitet: Das erarbeitete detaillierte CAD-Modell und ein R&I-Fließbild der Anlage dienten als Grundlage für die Fertigung und den Aufbau. Die Anlage besteht aus einem Grundrahmen, in den alle Komponenten (Wärmeübertrager, Kompressor, Expander, Pumpen, etc.) eingebracht werden. Die Verbindung der Komponenten erfolgte über Rohrleitungen, die aus

Formteilen individuell zusammengestellt wurden. Parallel zum mechanischen Aufbau erfolgte die Programmierung der Anlagensteuerung. Hier wurde im Besonderen darauf Wert gelegt, dass ein sicherer Betrieb mit einem ausreichendem Automatisierungsgrad erreicht werden kann. Mit dem Umzug der Pilotanlage ins Technikum „Speicherhaus“ am EnCN wurde Ende 2019 ein wichtiger Meilenstein gesetzt.



Abbildung 5: Montage der kombinierten Wärmepumpe-ORC Pilotanlage (Foto: EnCN/Zellner)

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 Projektjahr 2020.

Die finale Inbetriebnahme der Pilotanlage konnte trotz Verzögerungen durch die Corona-Pandemie weitgehend termingerecht im Frühjahr 2021 erfolgen. Hierzu wurde entsprechend der geltenden Sicherheitsvorschriften die Anlage auf technische Dichtheit geprüft, evakuiert und anschließend das ausgewählte Arbeitsfluid in die Anlage eingefüllt. Seitdem wird die Anlage in unterschiedlichen Messkampagnen erprobt. Die folgenden Abbildungen zeigen das Anfahren der Anlage im Wärmepumpen- und ORC-Betriebsfall. Weitergehende Erkenntnisse wurden in der Fachliteratur veröffentlicht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der Pilotanlage das Konzept eines reversiblen HP-ORC-Speichers erfolgreich dargestellt wurde. Auch für den Betrieb einzelner reversibler Komponenten konnten viele Erkenntnisse gesammelt und veröffentlicht werden. Die Pilotanlage soll auch über die Projektlaufzeit hinaus untersucht und dadurch weiterer Mehrwert für die Forschung an Carnot Batterien erzeugt werden.

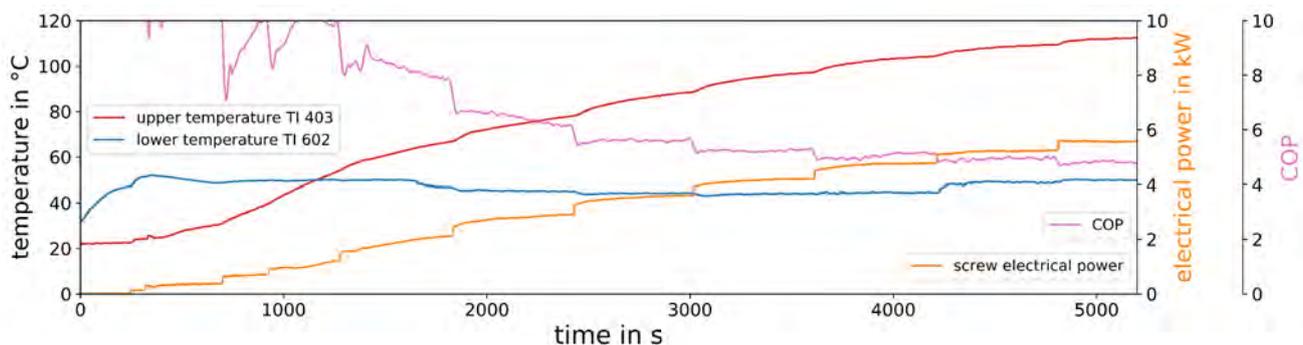


Abbildung 6: Anfahren der Pilotanlage im Wärmepumpen-Betriebsmodus

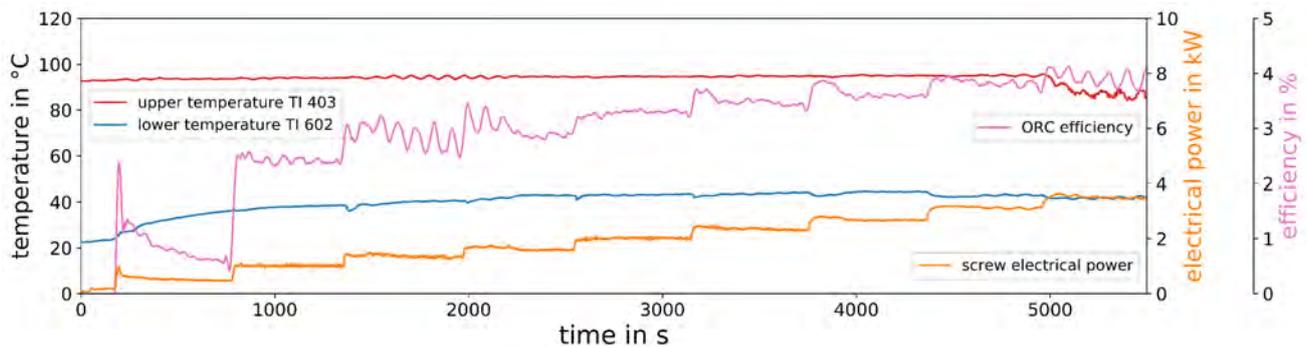


Abbildung 7: Anfahren der Pilotanlage im ORC-Betriebsmodus

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

Die Fördermittel wurden über die Projektlaufzeit nicht komplett ausgeschöpft, dies ist vor allem auf eine zurückhaltende Planung während der Corona-Pandemie zurückzuführen.

### 1.3 Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für die Modellregion Wunsiedel

*Tanja Schneider, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)*

Zuletzt sollen in diesem Arbeitspaket die technische und wirtschaftliche Machbarkeit des Einsatzes der reversiblen ORC-Technologie bewertet werden. Hierfür wurden Analysen basierend auf zwei verschiedenen Modellregionen durchgeführt. Für den Beispielstandort Wunsiedel konnten, durch die vor Ort bei Verbrauchern installierte Messtechnik, reale Lastgänge für Wärme- und Strombedarf exemplarischer Verbraucher im Versorgungsgebiet mit hoher zeitlicher Auflösung ermittelt werden. Zudem konnten für den zweiten bayrischen Standort Grafing reale Lastgänge eines gesamten des Versorgungsgebiets untersucht werden. Dadurch war eine umfassende technische und wirtschaftliche Evaluierung des Einsatzes der reversiblen ORC-Technologie möglich. Im Folgenden sollen drei betrachtete Einsatzszenarien genauer erläutert werden. Diese allgemeinen Modellierungsansätze machen eine zukünftige Übertragung auch auf andere Versorgungsgebiete und Standorte leichter möglich.

1. **Handel mit Börsenstrom:** Bei niedrigen Börsenstrompreisen wird Strom eingekauft und mittels der reversiblen ORC-Technologie gespeichert und zu Zeiten von hohen Börsenstrompreisen wiederverkauft. Dabei wird die Preisspanne zwischen Ein- und Verkaufspreis zur Refinanzierung des Investments genutzt.
2. **Peak-Shaving:** Überschüssiger Strom (Überkapazitäten) aus erneuerbaren Energien wird durch die reversible ORC-Technologie zu Zeiten hoher Netzlasten verschoben. Dies wird als Dienstleistung zur Netzstabilisierung gesehen und zukünftig mit einer zusätzlichen Speicherprämie vergütet, wodurch sich ein zusätzliches Investment für den reversiblen ORC lohnen kann.
3. **Autarkiegraderhöhung:** Die Kostenspreizung zwischen günstigerer Eigenstromerzeugung und Fremdbezug wird ausgenutzt. Eine Erhöhung der spezifischen Eigenerzeugungskosten durch die zusätzliche Investition eines reversiblen ORC's wird durch die Erhöhung des Eigenverbrauchs des erzeugten Stroms und die Preisdifferenz zum Fremdbezug kompensiert. Schließlich wird der Autarkiegrad durch den Einsatz des reversiblen ORC-Konzepts erhöht.

Als Datenbasis für die Berechnung dienten neben den realen Lastgängen aus Grafing die Day-Ahead Börsenstrompreise aus den Jahren 2011-2018. Die im Folgenden erläuterten Ergebnisse wurden im Rahmen eines entwickelten Modells zur Optimierung der Speichergröße einer einstufigen 100 kW<sub>el</sub> HP-ORC-Schaltung mit Rekuperator (Power-to-Power-

Wirkungsgrad 63,8 %)¹, sowie der wirtschaftlichen Realisierbarkeit gewonnen. Die für die Berechnungen angenommenen Investitionskosten betragen 10.000 €/MWh<sub>Wärme</sub> und 500 €/kW<sub>el</sub>, wobei beachtet werden muss, dass zunächst keine Skaleneffekte abhängig von der Anlagengröße einberechnet wurden.

Demnach wurden in Szenario 1 für die Jahre 2011-2018 verschiedene Grenzstrompreise für die Be- und Entladung eines 4 MWh Wärmespeichers berechnet. Für das Jahr 2014 und Grenzpreise für den Einkauf von 20 €/MWh bzw. Verkauf von 40 €/MWh ergeben sich schließlich 370 h Betriebsstunden bei 37 MWh eingespeichertem Strom. Entsprechend der Preisdifferenz kann somit ein Umsatz von rund 540 €/a erwirtschaftet werden, wobei die spezifischen jährlichen Investitionskosten noch nicht mit eingerechnet sind. Insgesamt ergab ein Einsatz der reversiblen ORC-Technologie zum Handel an der Strombörse daher keine ökonomisch darstellbare Alternative. Dies ist vor allem auf die wenigen Zeiten der Strompreisspitzen und -täler zurückzuführen, sowie vergleichsweise hohe Investitionskosten für große Speichergrößen.

In Szenario 2 wurde die Eignung der reversiblen ORC-Technologie zur Verschiebung von Erzeugungsspitzen zur Mittagszeit, im Fall Grafing aus der PV-Stromerzeugung, zu Zeiten von Lastspitzen in die Abend- und Morgenstunden betrachtet. Mit den aktuellen Rahmenbedingungen von 50 €/MWh PV-Erzeugungskosten und 110 €/MWh PV-Einspeisevergütung beträgt die optimierte Speichergröße für den Fall Grafing ca. 1,4 MWh. Diese optimale Größe ist als ein Trade-Off aus den hohen möglichen Beladungen im Sommer und der niedrigen PV-Erzeugungsleistung und entsprechend Beladung des Wärmespeichers im Winter zu sehen (s. Abbildung 8). Der demnach ausgelegte Speicher kommt in der Beladungszeit zwischen 10-16 Uhr auf ca. 673 Betriebsstunden jährlich und erwirtschaftet damit einem Umsatz von ca. 1.150 €/a.

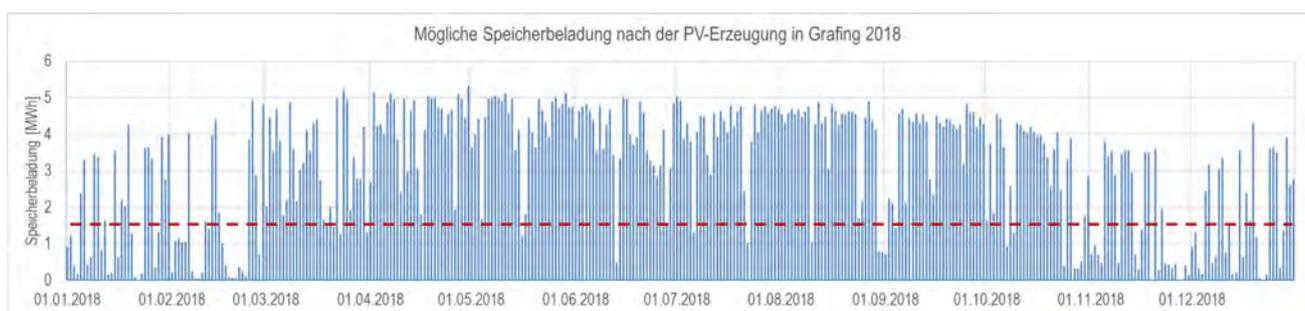


Abbildung 8: Mögliche Speicherbeladung nach der PV-Erzeugung in Grafing 2018 und optimierte Speichergröße

Da die Speicherung und Lastverschiebung in Zukunft im deutschen Energiemarkt für die Netzstabilisierung zunehmend entscheidend wird, ist analog zu der EEG-Einspeisevergütung eine Speichervergütung denkbar. Berücksichtigt man solch eine Pauschale im vorliegenden Szenario, kann bereits ab einer zusätzlichen Vergütung von 6 ct/kWh<sub>gespeichert</sub> ein wirtschaftlicher Betrieb der reversiblen ORC-Anlage verwirklicht werden.

Szenario 3 zeigt im Falle der hier betrachteten realen Lastgänge die erfolgversprechendsten Ergebnisse für eine Realisierung. Das Versorgungsgebiet Grafing muss derzeit noch durchschnittlich 40 % des notwendigen Stromverbrauchs von dem übergeordneten Bayernwerk beziehen. Aufgrund der anfallenden Fremdbezugskosten (angenommen hier 14 ct/kWh), soll die PV-Erzeugung (PV-Stromgestehungskosten 5 ct/kWh) in Grafing zunehmend ausgebaut werden. Hohe Stromerzeugung zur Mittagszeit bei Lastspitzen am Abend und Morgen führen wie in Szenario 2 angedeutet zu einer notwendigen Harmonisierung der Erzeugungs- und Verbrauchskurve. Aktuell wird der gesamte erzeugte PV-Strom sofort ins Netz eingespeist, allerdings kann dies im Falle einer zukünftigen Verdopplung oder einer Vervierfachung der PV-Erzeugungsleistung nicht mehr gewährleistet werden. Daher wurde für diese Fälle die Implementierung eines reversiblen ORC-Konzepts (Randbedingungen s. oben) geprüft. Die optimierten Speichergrößen für die Verdopplung bzw. Vervierfachung der PV-Leistung betragen 4 bzw. 6 MWh. Daraus resultieren die im folgenden Diagramm (Abbildung 9 links) dargestellten Stromkosten. Diese setzen sich aus den PV-Erzeugungskosten, dem resultierenden Wirkungsgradverlust und den spezifischen Investitionskosten pro entladene Kilowattstunde Strom zusammen. Eine

¹ Staub, S.; Bazan, P.; Braimakis, K.; Müller, D.; Regensburger, C.; Scharrer, D.; Schmitt, B.; Steger, D.; German, R.; Karellas, S.; Pruckner, M.; Schlücker, E.; Will, S.; Karl, J. Reversible Heat Pump–Organic Rankine Cycle Systems for the Storage of Renewable Electricity. *Energies* 2018, 11, 1352.

Reduktion der Investitionskosten bei größeren Nennleistungen sowie durch Skaleneffekte wird daher ebenso wie Prozessverbesserungen und Wirkungsgraderhöhungen zusätzlich zu einer Kostenreduktion führen (s. Abbildung 9 rechts).

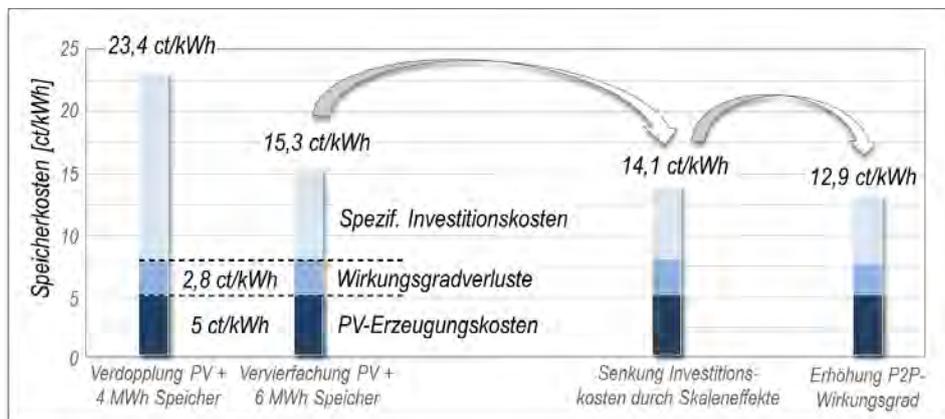


Abbildung 9: Zusammensetzung der Stromgestehungskosten einer PV-Erzeugung mit reversiblen ORC für den Fall Grafing

Aus einer Erhöhung der Eigenerzeugung resultiert eine Kostenersparnis durch den wegfallenden Fremdbezug, welcher die zusätzlichen Erzeugungskosten bei weitem überwiegt. Da die optimierten Speichergrößen nicht auf Spitzenerzeugungszeiten ausgelegt sind, resultieren weiterhin Erlöse aus der PV-Einspeisung in das übergeordnete Netz. Unter den aktuellen Randbedingungen ergeben sich für den Fall Grafing schließlich die in Abbildung 10 dargestellten Kostenersparnisse. Für den Fall der Verdopplung der PV-Erzeugungsleistung, liegt die Kostenersparnis gegenüber dem Ist-Zustand sowohl mit und ohne Speicher in einem ähnlichen Bereich. Nur der Autarkiegrad kann durch den Zubau des Speichers weiter erhöht werden. Im Falle der Vervierfachung zeigen sich geringfügig höhere Ersparnisse ohne den Zubau eines Speichers, wobei hier wiederum auf die vernachlässigten Skaleneffekte hingewiesen werden muss, welche die spezifischen Speicherkosten reduzieren würden. Darüber hinaus werden sinkende PV-Erzeugungskosten sowie steigende Fremdbezugskosten und sinkende Einspeisevergütungen den Speicherzubau begünstigen. Schon jetzt ermöglicht der Einsatz der reversiblen ORC-Technologie eine weitere Erhöhung des Autarkiegrads des Versorgers auf knapp 85 %.

Insgesamt zeigen die hier in Kürze dargestellten Ergebnisse nur einen Ausschnitt der modellierten Szenarien. Die dargestellten spezifischen Kosten sind verbraucherstrukturspezifisch, können allerdings mit Hilfe des entwickelten Modells auch für andere Modellregionen berechnet werden. In Zukunft ist zu beachten, dass durch steigende Fremdbezugskosten bei sinkenden Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien der Einsatz der reversiblen ORC-Technologie zunehmend an Bedeutung gewinnt.

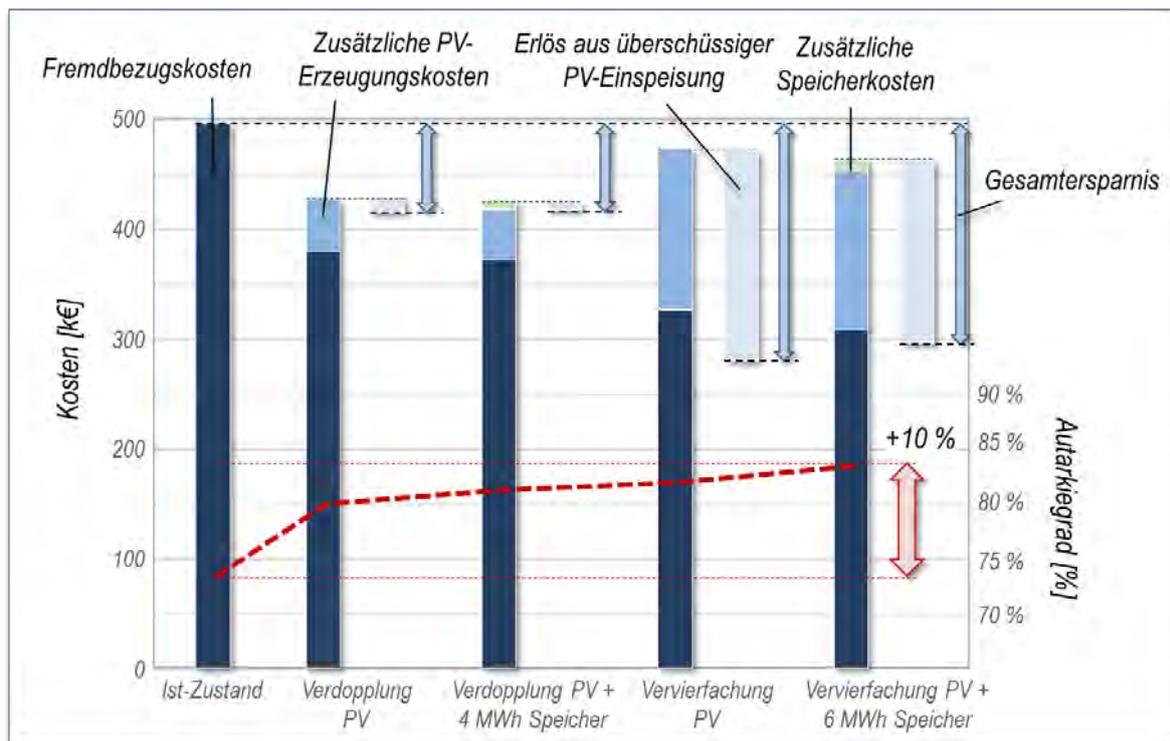


Abbildung 10: Kostenreduktion durch die Erhöhung der PV-Erzeugung und dem Einsatz der reversiblen ORC-Technologie im Fall Grafing für ca. 3.500 MWh/a

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

### 2.1 Sensibler Wärmespeicher für aufgewertete Niedertemperaturwärme

*Christoph Regensburger, Prof. Dr. Eberhard Schlücker (IPAT)*

Das Teilprojekt 2.1 wurde von Christoph Regensburger am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker bearbeitet. Das Projektziel war die Auslegung und der Bau eines Speichersystems für eine Carnot Batterie, in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus den anderen Teilprojekten.

Die Projektbearbeitung begann im Juni 2017 mit der Erarbeitung unterschiedlicher Speichervarianten und ihrem Potential im Hinblick auf den Einsatz als Wärmespeicher für eine Carnot Batterie, spezifisch in Verbund mit dem Wärmepumpen- und ORC-Prozess aus Teilprojekt 1.2.

Zur Abschätzung von Potentialen wurde dazu auch eine kleine Vorversuchsanlage am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (IPAT) in Erlangen errichtet. Der aus Polycarbonat gefertigte Speicherbehälter mit knapp 40 Litern Fassungsvermögen wurde mit diversen PT-100 Temperaturmessstellen versehen und ermöglichte die Erprobung unterschiedlicher Heißwasserspeichervarianten, die sich durch unterschiedliche Einbauten charakterisieren. Die Steuerung des Messsystems erfolgte mit der Software Lab-View.

Ein besonderes Augenmerk wurde bei den Vorversuchen auf die Effizienzsteigerung herkömmlicher Heißwasserspeicher gelegt. Das Einsatzgebiet für diese Speicherart ist auch aktuell enorm hoch, sowohl in privaten, wie auch im industriellen Einsatz. Interessant sind insbesondere leicht nachrüstbare und kostengünstige Innovationen zur Effizienzsteigerung.

Im Weiteren folgte der Vergleich unterschiedlicher Feststoffe und Fluide hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Speichermedium. Dabei wurden unter anderem Feststoffe mit Übertragungsfluid, sowie alternative Speicherfluide für die drucklose Speicherung über 100°C diskutiert. Potentiell sinnvolle Kandidaten, gerade bei Speichertemperaturen über 200°C, sind Feststoffschüttungen von Eisen oder Gestein mit einer hohen Wärmekapazität in Verbindung mit Thermoölen zur Wärmeübertragung.

In der Diskussion unterschiedlicher Speicherkonzepte bis 500 MWh bietet sich ein großes Potential in der modularen Bauweise des Speichers. Idee des Konzeptes ist eine Second-Life Lösung für alte standardisierte Transportcontainer. Bei einer entsprechenden Qualifizierung für die standortfeste Nutzung nachdem diesen nicht mehr für den Transport auf Straße und Schiff geeignet sind ergibt sich ein großes Potential an günstigen Behältern für die Speichernutzung mit geringem Umwelteinfluss. Aufgrund von festen Standards lassen sich einzelne Behälter einfach austauschen oder hinzufügen.

Zur Charakterisierung des Speichersystems im Hinblick auf das Strömungsverhalten wurde 2018 eine CFD Analyse durchgeführt. Dazu wurde ein Speicherschnitt simuliert. Die Simulation soll die Wanderung der Thermokline, die Übergangschicht von kaltem zu heißem Speichermedium, durch den Behälter darstellen. Problematisch hierbei sind die stark unterschiedlichen Skalen bei der Analyse. Zur Darstellung der Grenzsicht sind sehr feine Netzstrukturen notwendig, die aber wiederum in einem großen Behälter liegen. Im Hinblick auf die Rechenzeiten wurde eine 2D-Schicht simuliert. Dadurch gehen jedoch Informationen über 3D Effekte im Behälter verloren. Der Informationsgewinn über die Vorversuche hinaus hält sich an dieser Stelle in Grenzen. Für nähere Erkenntnisse zum exakten Strömungsverlauf müssen aufwendige 3D-CFD Simulationen durchgeführt werden, diese können jedoch nicht den gesamten Behälter abbilden. Das Potential der Vorversuche insbesondere bei im Hinblick auf den Scale-up Prozess und den daraus ersichtlichen Erkenntnisgewinn erscheinen zu diesem Zeitpunkt vielversprechender.

Zur Planung des Modell-Heißwasserspeichers wurde zunächst ein Prozessfließbild erstellt. Dieses zeigt die Speicher wie auch alle Ventile, Pumpen, Wärmeübertrager und das Durchausgleichssystem zur Kompensation der Volumenausdehnung. Außerdem wurden im weiteren Verlauf alle Messstellen und Sicherheitseinrichtungen hinzugefügt.

Zur Festlegung des Betriebspunkts der Carnot Batterie wurde eine Pareto-Optimierung durchgeführt die den Power-to-Power Wirkungsgrad der Gesamtanlage und die effektive elektrische Speicherkapazität des Systems, bei

unterschiedlichen Temperaturspreizung und Temperaturniveaus des Speichersystems, aufzeigt. Aus der Pareto Front wurde der Betriebspunkt mit einem Speicherhub vom 90°C auf 120°C ausgewählt. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und wurde in einem Design Freeze festgehalten.

Für das Speichersystem ergaben sich daraus veränderte Vorgaben im Vergleich zum Antrag. Als Speichertanks wurden zwei Behälter mit je 4 m<sup>3</sup> Speichervolumen als die sinnvollste Variante herausgearbeitet. Das Druckniveau wurde auf 6 bar abgesenkt was grundsätzlich noch einen Betrieb bis 150°C ermöglicht. Dadurch konnte jedoch eine sinnvolle Reduzierung der Kosten erreicht werden. Gleiches gilt für die Speicherkapazität, die sich auf 269 kWh, im Nennbetriebspunkt, reduziert. Für den Nennbetrieb in Volllast bei der Beladung von 90°C auf 120°C wird eine Beladezeit von etwa 1,5 Stunden erwartet.

Parallel zur Anlagenplanung wurden die oben genannten Vorversuche zur Verbesserung der Speichereffizienz durchgeführt. Dabei konnte eine Verbesserung des exergetischen Wirkungsgrads von 83,6 % auf 85,8 %, im dargestellten Betriebsfall, erzielt werden. Dazu wurde eine Einbaute im Behälter eingesetzt, welche die Vermischung verringert. Um die Thermokline optimal zu vermessen wird der Behälter überfüllt, wodurch die Thermokline vollständig aus dem Behälter herausgeschoben wird. Ein sinnvolles Werkzeug zur Analyse der Übergangsschicht ist die Auswertung der größten Steigung, die im Diagramm dargestellt ist.

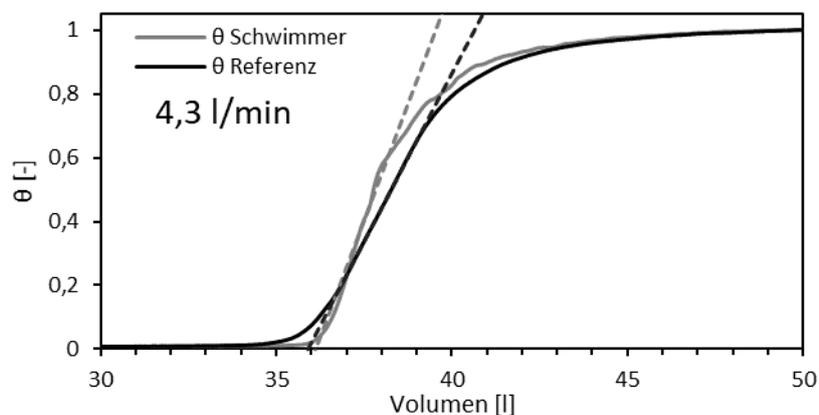


Abbildung 11: Optimierung der Beladung des sensiblen Wärmespeichers mittels Einbaute, bei einem Volumenstrom von 4,3 l/min

Im Jahr 2019 erfolgte die Bestellung der Anlagenkomponenten und die Fertigung der Anlagenteile. Im Januar wurden die Hauptkomponenten wie Pumpe, Wärmeübertrager, Hähne und Speicherbehälter in Auftrag gegeben.

Die Anlage wurde komplett als 3D-CAD geplant, dies ermöglicht die Planung und Fertigung aller Anlagenteile und Hilfsgerüste vor der Montage. Damit konnte eine virtuelle Anlage geplant und hinsichtlich der Flächennutzung in der Versuchshalle am Energie Campus Nürnberg optimiert werden.

Die resultierenden Rohrleitungsverläufe und Trägergestelle wurden modular gestaltet um eine einfache Handhabung und die Transportfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Insbesondere im Hinblick auf die Behälterhöhe von 3,9 Metern mussten die Rohrleitungen und das Traggestell entsprechend angepasst werden. Die gesamten Rohrleitungen wie auch die Trägergestelle wurden in der lehrstuhleigenen Werkstatt gefertigt.

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Sicherheit des Systems im Fehlerfall gelegt. Zum jederzeit sicheren Betrieb der Anlage wurden Überdruckventil und Unterdruckventile, zur Wahrung der Anlagensicherheit selbst beim Versagen der Steuerung, vorgesehen. Eine Abschaltung des Prozesses durch die Steuerung im Fehlerfall ist weiterhin vorgesehen, für die Sicherheit der Anlage jedoch nicht notwendig.

Der Aufbau der Hauptkomponenten der Anlage am Energie Campus Nürnberg erfolgte im Oktober 2019 rechtzeitig zur Langen Nacht der Wissenschaft, auf der das Projekt der Öffentlichkeit präsentiert wurde. Eine Fortführung der Montage war für Anfang 2020 geplant.

Leider wurden diese Aufbauarbeiten im Folgenden durch die Corona-Krise signifikant verzögert. Die regelmäßigen Besprechungen wurden auf ein Onlineformat verlegt. Im dritten Quartal konnten die Montagearbeiten an der Anlage unter Einschränkungen fortgesetzt werden. Die Verrohrungsarbeiten an der Anlage wurden abgeschlossen. Als signifikant stellten sich hier die Flexibilisierung komplexer Rohrabschnitte heraus, die eine spannungsarme Montage gewährleisten.

Die Programmierung der Steuerung hinsichtlich der Anlagenschaltung konnte weitestgehend abgeschlossen werden. Die Einbindung der Hallensignale, zur Warnung vor Externen gefahren, sowie der Temperaturmesstechnik und die entsprechenden Routinen zur Messdatenaufzeichnung stehen 2021 noch aus. Ebenfalls ausstehend waren an dieser Stelle noch entsprechende Bestellungen hinsichtlich der Messtechnik für die ein heißer Betrieb der Anlage abgewartet werden sollte.

Aufgrund der pandemischen Lage wurde die theoretische Ausarbeitung des Speicherkonzepts intensiviert. Dazu wurden alternative Speicherbetriebe ausgearbeitet, die bei geringer baulicher Variation an der Anlage realisiert werden können. Dazu wurde unter anderem ein Speicherkonzept auf der virtuellen Konferenz „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.

Im ersten Quartal 2021 kam es aufgrund von Undichtigkeiten an der Wartungsöffnung der Behälter erneut zur Verzögerung bei der Inbetriebnahme. Um weitere Verzögerungen vorzubeugen wurde die Bestellung der Temperaturmesstechnik für den Behälter und die entsprechenden Steuerungskarten vorgezogen und bereits im Februar ausgelöst. Aufgrund von unerwarteten Lieferschwierigkeiten des Steuerungsherstellers konnten die Messkarten jedoch erst im August 2021 geliefert werden. Dies schränkte die Vermessung des Behälters weiter ein.

Nach intensiver Diskussion mit Behälterhersteller und Dichtungsherstellern konnte einen Dichtungstyp für die Wartungsöffnung gefunden werden, der vollständig dichtet und mit den Druckschwankungen im System aufgrund der Temperaturveränderungen zurechtkommt, nachdem die mitgelieferten Dichtungen ihre Aufgabe nicht erfüllen konnten. Verwendet werden dazu Flachdichtungen aus zwei Lagen mit je 2 mm Graphitdichtung mit Streckmetalleinlage. Diese gewährleisten bereits beim Aufwärmen vollständige Dichtigkeit, bleiben formstabil und kommen auch mit den vorliegenden Druckschwankungen im Prozess zurecht.

Im zweiten Quartal wurde das Projekt 1.2 intensiv bei der Inbetriebnahme und Vorvermessung des Beladesystems unterstützt.

Mitte des Jahres folgte die warme Inbetriebnahme des Speichersystems. Dabei wurde das System zunächst auf 90°C erhitzt. Im weiteren Verlauf konnte auch die Temperatur von 120°C und bis 4 bar Überdruck realisiert werden. Damit können alle ausgelegten Betriebsmodi realisiert werden. Das System ist an dieser Stelle dauerhaft dicht. Damit wurde die Anlage vollständig isoliert und ist grundsätzlich betriebsbereit. Die Messtechnik in den Behältern wurde vorinstalliert konnte jedoch aufgrund der genannten Lieferverzögerungen nicht in der Anlagensteuerung angeschlossen werden.



Abbildung 12: Fertiggestellte Gesamtanlage bestehen aus HP/ORC Prozess (links) aus Teilprojekt 1.2 und Heißwasserspeichersystem (rechts) aus Teilprojekt 2.1

Im dritten und vierten Quartal des Jahres 2021 konnten erste Test der Gesamtanlage durchgeführt werden.

Die folgende Messung zeigt einen ausgewählten Betriebspunkt der Anlage, bei dem der Speicher im Dauerbetrieb vollständig auf eine Temperatur von 90°C beladen wurde. Als Speicherhub wurde eine Temperaturdifferenz von 20°C gewählt. Die Gesamtversuchsdauer beträgt 4,75 Stunden. Dabei wurde der Speicher mit einer Energiemenge von 93 kWh beladen. Die durchschnittliche Beladeleistung beträgt 19,6 kW die maximale Leistung beträgt 29,5 kW diese wird im Bereich der Überbeladung im Anfangszeitraum der Speicherbeladung erreicht.

Die Abbildung 13 zeigt die Temperatur am oberen Speichereingang T07 und die am unteren Speicherausgang T08 in °C. Außerdem ist das akkumulierte geförderte Wasservolumen aufgetragen. Bei dem eingezeichneten Wert von 4 m<sup>3</sup> ist dabei das Speichervolumen des Behälters in etwa erreicht.

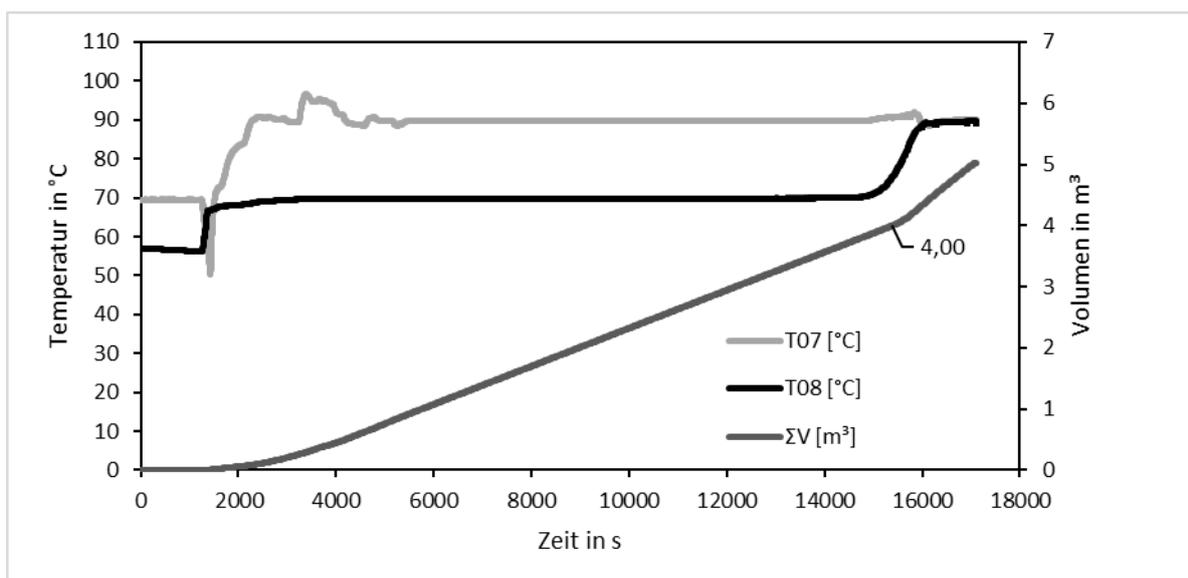


Abbildung 13: Speicherbeladung von 70°C auf 90°C über die Zeit mit akkumuliertem gefördertem Volumen

Wie in der Abbildung 13 zu sehen, wird am Schluss der Messung der Speicher weiter über das Fassungsvermögen des Behälters hinaus befüllt. Dies dient dazu die Thermokline, den Übergang von kaltem zu heißem Speichermedium,

vollständig aus dem Behälter zu schieben. Damit kann die Thermokline mit Hilfe des Wärmepumpenprozesses ausgeglichen werden. Dies wurde in der Anlagenplanung als kritischer Punkt gesehen. Um eine Beladung mit einer Temperatur deutlich über 90°C zu verhindern, ist es notwendig den Volumenstrom im Speichersystem stetig zu steigern, dies ist in Abbildung 14 dargestellt. Die durch den Wärmepumpenprozess zugeführte Wärme steigt bei dem Kompensationsvorgang nur geringfügig über 90°C. Im Bereich um 16000 s zeigt sich dann kaum noch eine Veränderung der Temperatur, hier wird nahezu keine Wärme mehr übertragen. Dies ist auch bei der Betrachtung der Energieübertragung auf den Speicher in Abbildung 14 ersichtlich.

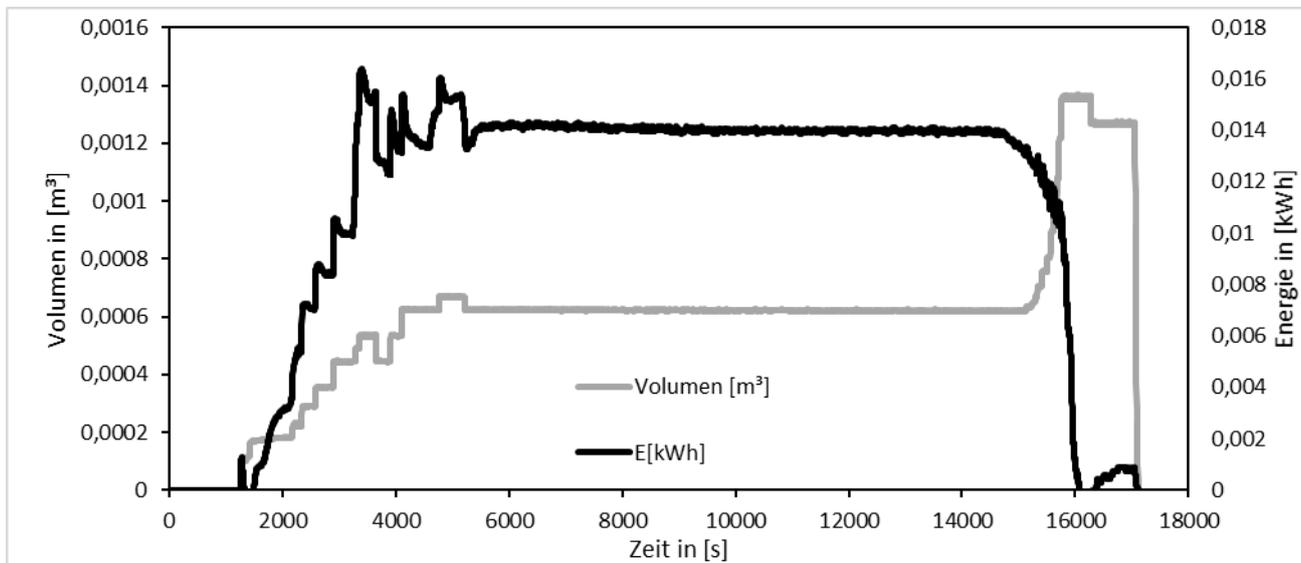


Abbildung 14: Volumen in  $m^3$  und übertragene Energie in kWh aufgetragen über die Beladedauer in s bei der vollständigen Speicherbeladung von 70°C auf 90°C

In kurzzeitigen Betrieb wurden bereits höhere Endtemperaturen bis 110°C im Verbund von Speicher und Beladesystem erreicht. Dauertest konnten bisher auf diesem Temperaturniveau aber noch nicht durchgeführt werden und stehen noch aus. Leider ist festzustellen, dass die Corona Krise mit Ihrem Einfluss auf das Arbeitsleben und die Verfügbarkeit von Komponenten einen signifikanten Einfluss auf die Fertigstellung der Anlage und ihrer umfangreichen Vermessung hatte. Der Dauertest zeigt jedoch die zuverlässige Funktionsfähigkeit und die Betriebsstabilität des Gesamtsystems im Dauerbetrieb.

Die Carnot-Batterie hat das Potential auch bei höheren Temperaturen betrieben zu werden, was den Gesamtwirkungsgrad positiv beeinflussen kann und auch die Nutzung höherwertiger Abwärme bis 90°C sinnvoll macht. Es besteht ein großes Potential für erfolgreiche Folgeprojekte, die den Anlagenbetrieb weiter optimieren und damit die Prozesseffizienz verbessern können.

Nach der Förderphase soll im Jahr 2022 weiter an der Carnot Batterie gearbeitet werden. Dazu sind zunächst für das erste Quartal 2022 Messung zur Optimierung des Heißwasserspeichersystem geplant.

Grundsätzlich wurde auch die Mittelübernahme aus dem Teilprojekt 1.2 HP/ORC und 2.1 Heißwasserspeicher beantragt. Je nach Genehmigung kann damit die Carnot-Batterie im Jahr 2022 unter Umständen weiter vermessen und an Folgeprojekte übergeben werden.

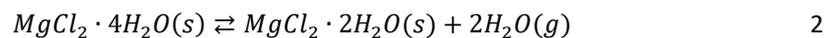
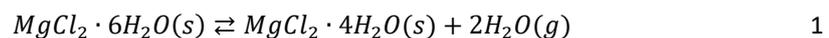
## 2.2 Entwicklung druckloser Latentwärme-Speicherkonzepte für Temperaturen bis 150 °C

Karsten Müller (TVT), Simon Pöllinger (ZAE)

Im Arbeitspaket 2 wurden am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik unter der Leitung von Herrn Dr. Müller und einem weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiter Systeme zur Nutzung der Schmelzwärme von  $MgCl_2 \cdot H_2O$  sowie zur Nutzung der Hydratisierungswärme desselben Stoffsystems für die drucklose Speicherung thermischer Energie bis 150 °C untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde am ZAE Bayern ein Latentwärmespeicher mit einer thermischen Speicherkapazität von 500 MWh konzipiert und ausgelegt.

### 2.2.1 Thermische Energiespeicherung auf Basis der Hydratisierungswärme

Bei diesem Speicherkonzept wird die Reaktionsenthalpie der reversiblen Wasserabspaltung aus Magnesiumchloridhexahydrat genutzt um thermische Energie zu speichern. Hierbei können theoretisch bei Temperaturen bis 150 °C fünf der sechs Wassermoleküle abgespalten werden. Durch die Umkehrung des Prozesses, kann anschließend thermische Energie freigesetzt werden. Da jedoch ab Temperaturen von 130 °C irreversibel Salzsäure gebildet wird, können in der praktischen Anwendung nur die in Gleichung 1 und 2 angegebenen Reaktionsschritte bis hin zum Dihydrat genutzt werden.



Magnesiumchloridhexahydrat besitzt eine geringe Deliqueszenzfeuchte von 33 % bei einer Temperatur von 30 °C. Dies bedeutet, dass sich das Material ab einer Luftfeuchtigkeit von 33 % in sich selbst aufgelöst bzw. überhydratisiert wird. Folglich muss bei der Anwendung durchgehend darauf geachtet werden, dass die Luftfeuchtigkeit den entsprechenden kritischen Wert nicht überschreitet. Um den Einfluss dieses Effekts auf die Zyklenstabilität und auf die erreichbare Energiedichte des Hydratisierungsspeichers zu testen, wurde der in Abbildung 15 dargestellte Laboraufbau in Betrieb genommen.

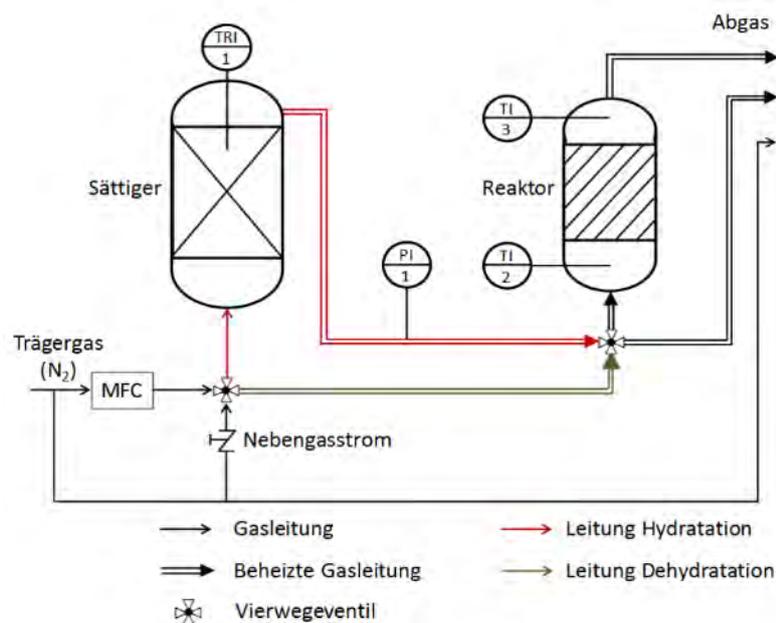


Abbildung 15: Laboraufbau zur Bestimmung der Energiedichte und Zyklenstabilität eines Wärmespeichers auf Basis der Hydratisierungswärme von  $MgCl_2 \cdot H_2O$

Bei den Versuchen wurde als Ausgangsmaterial  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  eingesetzt. Anschließend wurde für 3 Stunden bei einer Temperatur von  $110\text{ }^\circ\text{C}$  der Speicher durch ein hindurchströmendes Trägergas getrocknet. Im darauffolgenden Hydratisierungsschritt wird das Trägergas mit einer Luftfeuchtigkeit von 30 % (unterhalb der Deliqueszenzfeuchte) in den Reaktor geleitet und somit Wärme freigesetzt. Die freigesetzte Wärme, wie sie in fünf aufeinander folgenden Zyklen beobachtet wurde, ist Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Energiedichte nach 5 Zyklen der Hydratisierung von Magnesiumchlorid-Hexahydrat nach einer Dehydratisierung bei  $110\text{ }^\circ\text{C}$

Zyklus	1	2	3	4	5
Energiedichte / $\text{kJ kg}^{-1}$	81,6	89,0	76,6	74,3	<b>51,0</b>

Es zeigt sich, dass trotz Einhaltung der geringen Luftfeuchtigkeit die Energiedichte beim 5. Zyklus erheblich abfällt. Obwohl im Hydratationsschritt die Luftfeuchtigkeit eingestellt werden kann, kann eine lokale Überschreitung der Deliqueszenzfeuchte nicht sichergestellt werden. Hierdurch kommt es zum Verkleben des Salzhydrates und zum teilweisen Verlust der Zugänglichkeit des Speichermaterials. Eine Konsequenz daraus ist das Verkleben der Partikel, die im Extremfall zu einem einzigen, sehr großen Klumpen verbacken (vgl. Abbildung 16). Durch die Verlangsamung des Stofftransports bricht die abgreifbare Leistung deshalb in der Folge stark ein. Des Weiteren steigt der Druckverlust des durchströmenden Trägergases stark an. Insbesondere am Reaktoreingang kommt es zur Ausbildung eines stark verklumpten Bereichs. Folglich kann dieses Material nicht für den Einsatz in einem derartigen Speicher empfohlen werden.



Abbildung 16: Magnesiumchloridhydrat nach dem Einsatz als thermochemischer Energiespeicher; infolge der Hydratisierung treten Agglomerationseffekte zwischen den Partikeln auf (links im Bild), welche die Zyklenfähigkeit reduzieren

Als Folge muss konstatiert werden, dass der Einsatz der Hydratisierung von Magnesiumchlorid zur thermischen Energiespeicherung über eine größere Anzahl von Zyklen technisch nicht sinnvoll ist. Der Schwerpunkt wurde deshalb auf latente Wärmespeicherung gelegt.

### 2.2.2 Thermische Energiespeicherung auf Basis latenter Wärme

Das zuvor diskutierte Problem der Überhydratation spielt bei der Speicherung latenter Wärme keine Rolle, da hier ein geschlossenes Speichersystem verwendet wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 17 dargestellt. Hierbei wird ein Thermo-Öl mit einer Temperatur von 136 °C in ein innenliegendes, beripptes Wärmeübertragungsrohr geleitet.

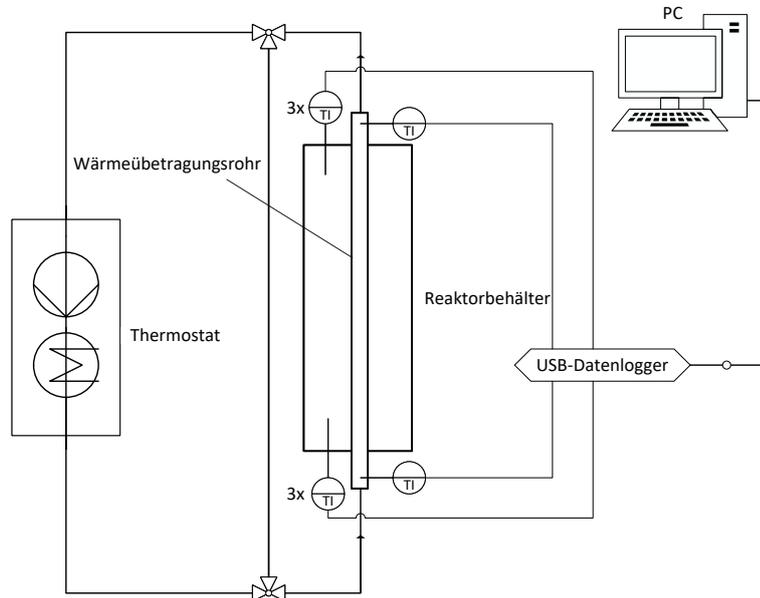


Abbildung 17: Versuchsaufbau des latenten thermischen Energiespeichers

Durch die eingetragene thermische Energie schmilzt das im Außenmantel vorgelegte Magnesiumchloridhexahydrat bei konstanter Temperatur von 116,7 °C. Ist der Schmelzvorgang abgeschlossen, wird das Thermo-Öl zum Entladen des Speichers mit 96 °C in das Übertragungsrohr geleitet. Durch den Kristallisationsvorgang im Außenmantel wird das Thermo-Öl aufgeheizt. Die Temperaturdifferenz bei diesem Aufheizvorgang zwischen Ein- und Austritt des Öls ist hierbei proportional zur gespeicherten Wärme. Die erzielten Energiedichten sind deutlich höher als bei Hydratisierung und bleiben über mehrere Zyklen konstant (Tabelle 2). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Einsatz des Systems nur bei Temperaturen um den Schmelzpunkt von 116,7 °C sinnvoll ist.

Tabelle 2: Energiedichte des latenten Wärmespeichers auf Basis von Magnesiumchloridhexahydrat in fünf Zyklen

Zyklus	1	2	3	4	5
Energiedichte kJ / kg	183	176	185	188	187

Zur Analyse des Schmelz- und Kristallisationsfronten im System, werden die Versuche in einem Computertomographen durchgeführt, welcher es ermöglicht Querschnittsbilder an unterschiedlichen Positionen im Reaktor mit einer zeitlichen Auflösung von 7 Sekunden aufzunehmen. Ein Beispielbild einer Querschnittsposition ist in Abbildung 18 dargestellt. Die klar erkennbare Front zeigt, dass diese Messmethode sehr gut geeignet ist, um den Prozess genauer analysieren zu können.

Als Material für die Speicherung latenter Wärme, das heißt Wärme, die durch einen Phasenwechsel aufgenommen bzw. abgegeben wird, wurde wiederum Magnesiumchloridhexahydrat untersucht. Die wesentliche Herausforderung stellt dabei der Wärmetransport dar. Um diesen näher zu untersuchen und verbesserte Wärmeübertragungskonzepte abzuleiten, wurde ein Simulationsmodell aufgesetzt. Zur Validierung desselben und zu seiner Weiterentwicklung wurden die Messungen mittels der Computertomographie (CT) verwendet.

Die Simulation wurde mithilfe der Software Comsol Multiphysics durchgeführt. Das erhaltene grundlegende Modell ist in der Lage den Temperaturverlauf qualitativ sinnvoll zu beschreiben. Die Geschwindigkeit des Schmelzvorgangs wird dabei aber deutlich überschätzt. Insbesondere bei den technisch besonders interessanten berippten Wärmeübertragern

ergeben sich nicht unerhebliche Abweichungen. Basierend auf den normalerweise verfügbaren Temperaturmessungen ließen sich Modifikationen des Modells vornehmen, um den Vorgang genauer zu beschreiben. Allerdings bieten diese nur eingeschränkt Informationen über den Zustand des Systems (die Temperatur ist nur für eine bestimmte Position innerhalb des Phasenwechselmaterials bekannt). Jede Verbesserung steht daher immer in der Gefahr einen Overfit darzustellen. Durch die Röntgen-Computertomographie ist es gelungen die räumliche Verteilung der einzelnen Phasen zu jedem Zeitpunkt genau zu erfassen. Dadurch lässt sich die Abweichung der Simulation von der Realität sehr viel umfassender erfassen und Schwachpunkte des Modells zuverlässiger identifizieren

Als Beispiel sei der Durchmesser der Schmelzfront als Funktion der Zeit genannt. Bei einem berippten Wärmespeicher lässt sich dies vereinfacht durch zwei Durchmesser darstellen: Den Durchmesser zwischen den Rippen und denjenigen an den Spitzen der Rippen. In der Abbildung sind die beiden Durchmesser jeweils als durchgezogene Linie für die CT-Messungen dargestellt und als gestrichelte Linie für das Basismodell. Die Verläufe von Messung und Simulation sind über weite Strecken sehr ähnlich, weisen in einigen Bereichen aber erhebliche Unterschiede auf. An der Spitze der Rippe überschätzt das Modell die Schmelzgeschwindigkeit zunächst erheblich, während sie zwischen den Rippen sehr gut vorhergesagt wird. Im weiteren Verlauf des Schmelzvorgangs laufen Messungen und Simulation zunächst weitgehend parallel. Erst kurz vor dem Abschluss überschätzt die Simulation die Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den Rippen erheblich. Mit Hilfe der neuen Messmethodik konnte gezeigt werden, dass dies im Zusammenhang mit der thermischen Interaktion mit der Außenwand des Behälters steht. Diese Ergebnisse ermöglichen es Modelle für Phasenwechselmaterialien deutlich zu verbessern.

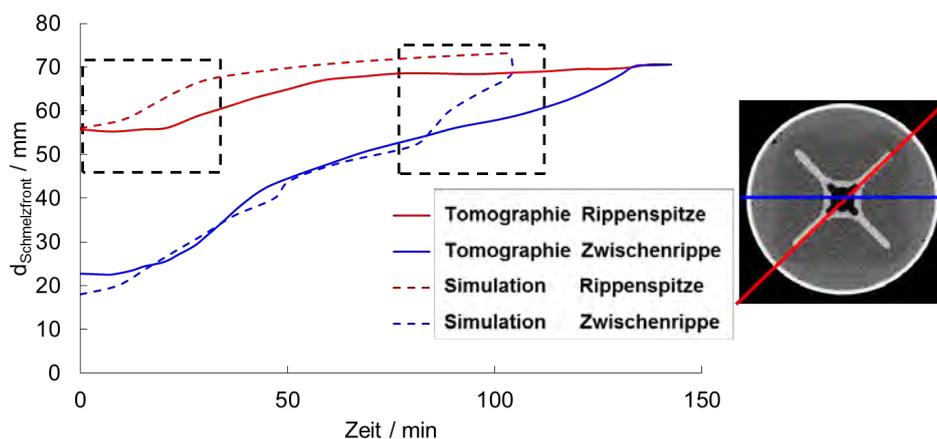


Abbildung 18: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schmelzfront zwischen und an den Spitzen der Wärmeübertragerrippen in der Simulation mit Comsol Multiphysics und in der experimentellen Auswertung der Computertomographie

### 2.2.3 Konzept für einen großen modularen Latentwärmespeicher

Für einen Latentwärmespeicher auf Basis von  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  mit einer Kapazität von 500 MWh werden Füllmengen in der Größenordnung von 5000 m<sup>3</sup> benötigt. Bei solchen für Latentwärmespeicher sehr großen Volumina bietet sich ein modulares Speicherkonzept an. Die Unterteilung in kleinere Einheiten vereinfacht die Konstruktion von Behälter und Wärmeübertrager. Zusätzlich können einzelne Einheiten gewartet werden, ohne dass die gesamte Anlage außer Betrieb gesetzt werden muss. Eine Erweiterung der Anlage wird ebenfalls erleichtert.

Das für den 500 MWh-Speicher entwickelte Konzept basiert auf 40'-ISO-Container. Der Wärmeübertrager eines Container-Moduls ist aus vielen parallel geschalteten Rohrelementen aufgebaut. Jedes Element ist mäanderförmig gebogen, so dass das Wärmetransportfluid den Speicher mehrfach vertikal durchströmt. Um die Inbetriebnahme zu erleichtern, sind mehrere Elemente zu separat absperrbaren Untergruppen zusammengefasst.

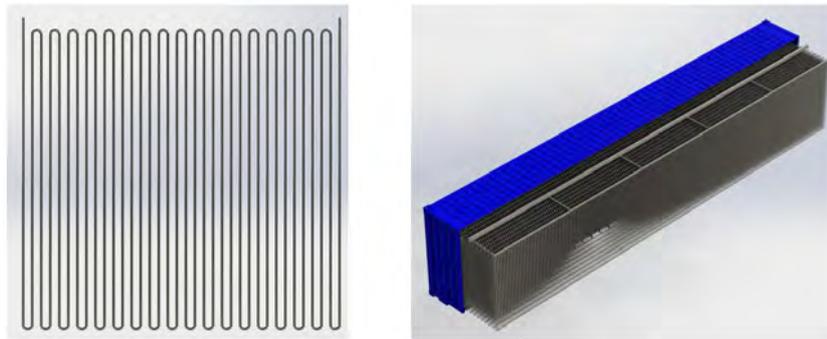


Abbildung 19: Rendering eines Wärmeübertragerelements (links) und eines kompletten Speichermoduls (rechts)

Mit verschiedenen Herstellern wurden Gespräche zur Umsetzbarkeit einzelner Aspekte des Konzeptes geführt. Für die Herstellung der Wärmeübertragerelemente wurde ein Fertigungsablauf gefunden, bei dem das Zusammensetzen des mehrere dutzend Meter langen Rohrelements aus Teilsegmenten trotz der kleinen Biegeradien möglich ist. Da das PCM gegenüber den meisten metallischen Werkstoffen korrosiv ist, wurde nach einer passenden Beschichtung gesucht, die auf die Wärmeübertragerelemente aufgebracht werden kann. ECTFE ist chemisch beständig gegenüber hochkonzentrierten Magnesiumchlorid-Lösungen und temperaturbeständig im geplanten Anwendungsbereich. Bei der Recherche zum Einsatz eines Frachtcontainers als Speicherbehälter wurde die Empfehlung geäußert, statt eines Umbaus mit einem Neuaufbau des Behälters zu planen.

#### 2.2.4 Thermische Auslegung des Speichers

Die thermische Auslegung des Speichers wurde anhand instationärer Finite-Volumen-Simulationen des Beladevorgangs bei konstanten Bedingungen durchgeführt. Es wurde ein numerisches Modell eines einzelnen Wärmeübertragerelements erstellt, das das umgebende PCM und das Wärmetransportfluid umfasst. Die Geometrie wurde so vereinfacht, dass sowohl der Wärmetransport als auch die Strömung des Fluids in einem radialsymmetrischen 2D-Modell abgebildet werden konnte.

Als Zielgröße für die Auslegung wurde in Anlehnung an die Systembeschreibung im Projektantrag eine Be- und Entladedauer von 10 h angenommen. Daraus leitet sich bei einer Kapazität von 500 MWh eine mittlere thermische Leistung des Gesamtspeichers von 50 MW ab. Als weitere Randbedingungen wurden eine Beladetemperatur von 130 °C und eine Entladetemperatur von 100 °C festgelegt. Parameter, die als anpassbare Freiheitsgerade für die Auslegung zur Verfügung standen, waren der Rohrdurchmesser der Wärmeübertragerelemente, der Abstand zwischen den geraden Rohrabschnitten (beziehungsweise der Biegeradius) und der Volumenstrom des Wärmetransportfluids. In einer Parameterstudie wurden diese drei Variablen in 125 Einzelsimulationen in technisch sinnvollen Grenzen variiert. Anhand der Ergebnisse wurde ein Parametersatz identifiziert, mit dem der Speicher die definierte Leistungsanforderung erfüllt. Bei dieser Konfiguration beträgt der Rohrdurchmesser 20 mm, der Rohrmittenabstand 65 mm und der Volumenstrom 15 m<sup>3</sup>/h (pro Container-Modul). Der Verlauf der Beladeleistung zeigt ein, für Latentwärmespeicher typisches, Plateau bei etwa 0,5 MW. Die berechnete Speicherkapazität pro Container-Modul beträgt bei den verwendeten Randbedingungen 5,56 MWh. Für eine Gesamtkapazität von 500 MWh müssten daher 90 Container installiert werden.

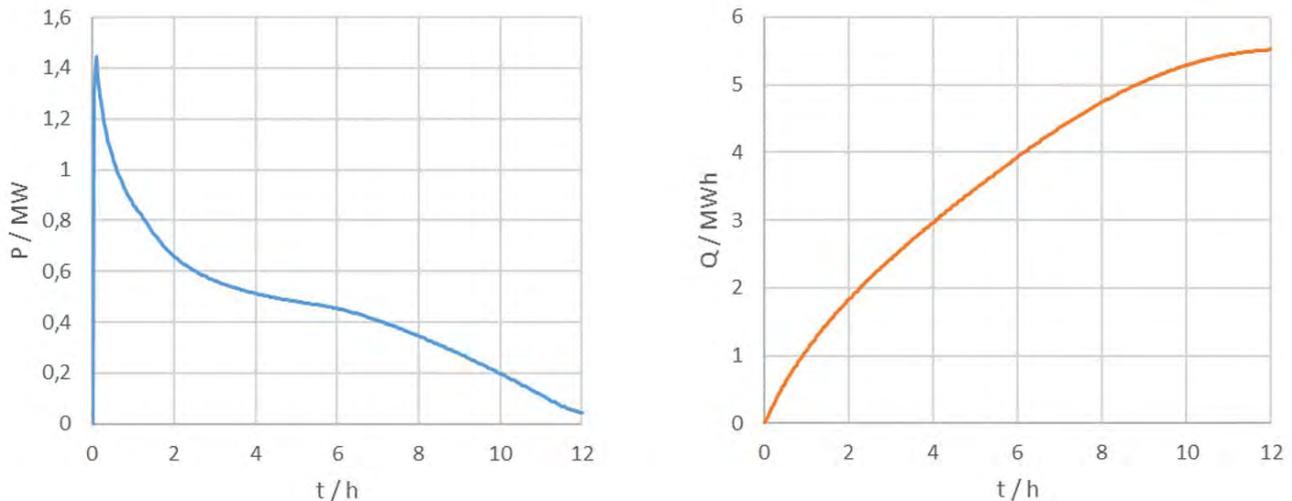


Abbildung 20: Verlauf der thermischen Leistung eines Speichermoduls (links) und der übertragenen Wärmemenge beim Beladen eines Speichers mit dem optimierten Parametersatz

### 2.2.5 Kostenabschätzung

Für die Fertigung der wichtigsten Bestandteile des Speichers und die Beschaffung des PCM wurden Angebote eingeholt und Preise ermittelt. Insgesamt ergaben sich Kosten von etwa 200.000 € für ein Container-Modul. Davon fallen etwa 81 % auf die Fertigung und Beschichtung der Wärmeübertragerelemente. Der Anteil der Kosten für die Beschaffung des Magnesiumchloridhexahydrats beträgt weniger als 4 % der Gesamtkosten.

Damit ergeben sich für den Gesamtspeicher spezifische Kosten von etwa 36 €/kWh.

## 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)*

Für das von den Projektpartnern entwickelte HP-ORC-Speicher-System wurden in diesem Arbeitspaket Simulationsmodelle auf Basis von Energieflüssen zur Dimensionierung und wirtschaftlichen Bewertung des Betriebs der Anlage entwickelt. Die von den Projektpartnern ermittelten Kenngrößen für die Einzelsysteme wurden in das Simulationsmodell bestehend aus Niedertemperatur-Speicher (TP SP1-2) und HP-ORC-System (TP SP1-1) übernommen. Darauf aufbauend wurden verschiedene Energiesystemszenarien modelliert, analysiert und die Ergebnisse veröffentlicht.

Seit dem 01.01.2017 wurde mit den Fördermitteln für Personalkosten Herr Dr.-Ing. Peter Bazan als wissenschaftlicher Mitarbeiter zur Bearbeitung dieses Arbeitspaketes eingestellt. Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurde er durch Herrn Daniel Scharrer mit seiner Expertise auf dem Gebiet der Thermodynamik unterstützt, der auch die interdisziplinäre Schnittstelle zu den Projektpartnern vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) und Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (iPAT) betreute. Die Weiterentwicklung des in der ersten Projektphase entstandenen Energiesystems Simulationsframeworks i7-AnyEnergy [25] wurde durch den Masterstudenten Malte Koenen unterstützt. In dieses Framework wurden die Komponenten des HP-ORC-Speicher-System Modells integriert.

Das Framework i7-AnyEnergy [25] wurde für interdisziplinäre Projekte mit verschiedenen EnCN-Institutionen und für Drittmittelprojekte eingesetzt. Zusätzlich wurden Kooperationen mit Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen eingegangen. Reinhard German konnte eine dauerhafte Kooperationsbeziehung mit der Monash University, Melbourne, Australien auf dem Gebiet „IT for Energy“ aufbauen. Im Jahr 2020 wurde er als Adjunct Professor ernannt und ist dort Mitglied der Faculty for IT. Seit 2016 ist er auch wissenschaftlicher Sprecher der Themenplattform „Vernetzte Mobilität“ im Zentrum Digitalisierung.Bayern (ZD.B) und Mitglied des ZD.B-Koordinierungskreises; die Ernennung wurde von Staatsminister Aiwanger für die Jahre 2020 und 2021 verlängert. Im Rahmen dieser Arbeit werden Vernetzungen

zwischen Mobilitäts- und Energiethemen betrachtet, so auch in dem ZD.B-Fellowship von 2018 bis 2020 von Jonas Schlund mit den Themen Blockchain für verteilte Energiespeicher sowie Systemdienstleistungen durch große Flotten von Elektrofahrzeugen. Das Projekt wurde von Jonas Schlund mit seiner Promotion erfolgreich abgeschlossen.

Das Forschungsprojekt „Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext (KOSiNeK)“ wurde von Oktober 2016 bis Ende 2019 im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms durch das BMWi gefördert. Die Projektkoordination erfolgte durch den Lehrstuhl Informatik 7, weitere Partner waren die Lehrstühle für Wirtschaftsmathematik und elektrische Energiesysteme. Darüber hinaus wurde das Projekt von einem industriellen Beirat begleitet, welcher durch den Cluster Energietechnik der Bayern Innovativ GmbH koordiniert wurde. An den Lehrstühlen wurden in drei Teilprojekten ein Optimierungs-, ein Simulations- sowie ein elektrisches Netzmodell entwickelt, um umfassende Berechnungen und Untersuchungen verschiedener Szenarien für das zukünftige elektrische Energieversorgungssystem in Deutschland durchführen zu können. Dabei bauen alle drei Modelle auf eine gemeinsame Datenbasis auf und wurden iterativ gekoppelt. Durch die ganzheitliche Betrachtungsweise von Kraftwerksausbau, Kraftwerkseinsatz und elektrischer Netzanalyse konnten einerseits die Methoden zur Energiesystemanalyse weiterentwickelt und andererseits interessante Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung des deutschen Energieversorgungssystems ermittelt werden. In allen betrachteten Szenarien zeigt sich, dass Deutschland von einem Stromexportland zu einem Stromimporteurland im Jahr 2030 werden wird. Darüber hinaus können durch den starken Zubau erneuerbarer Energieträger die strombedingten CO<sub>2</sub> Emissionen reduziert werden. Der Abschlussbericht des Projekts wurde Ende Juni 2020 dem Projektträger Jülich übergeben. Zusätzlich wurde vom Cluster Energietechnik der Bayern Innovativ GmbH ein kurzer Bericht zum Projekt und den erzielten Ergebnissen veröffentlicht [26].

Weitere Drittmittelprojekte waren das BMBF-Projekt „Analyse des Energiesystems von Palästina“ (PalGrid). Hier wurden in Kooperation zwischen Informatik 7, Energieinformatik und University of Birzeit von 2017 bis 2019 Modelle zum Einfluss von Speichern auf die Stromerzeugungsbilanz untersucht.

In Kooperation mit der Siemens AG Erlangen wurde das Drittmittelprojekt „Multi Battery Systems - Hybrid and New Storage Simulation Tool“ von Paul Dicke bearbeitet und mit seiner Promotion abgeschlossen. Ziel des Projekts war die Modellierung geläufiger Speichertechnologien, wie Lithium-Ionen- und Blei-Batterien [26]. Zusammen mit der Siemens AG und der FAU wurde das globale Patent „Verfahren zum Simulieren eines Batteriesystems durch Vorgeben einer Diffusionsrate während eines Lade-/Entladeprozesses sowie elektronische Recheneinrichtung“ angemeldet (Patent [1]).

Das Drittmittelprojekt „Koordinierte Kleinspeicher im Verteilnetz der N-ERGIE Aktiengesellschaft - Storage With Ample Redundant Megawatt (SWARM)“ wurde von David Steber mit seiner Promotion abgeschlossen [28]. Dieses Projekt in Zusammenarbeit mit der N-ERGIE AG wurde in Kooperation des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme, des Lehrstuhls für Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) und des Lehrstuhls für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie am EnCN durchgeführt. Es untersuchte unter welchen Bedingungen Privathaushalte in innovative Stromspeicher investieren, wie sich diese Speicher auf die Stabilität des Stromnetzes auswirken und welchen ökonomischen Nutzen sie aus Sicht des Netzbetreibers bzw. der Privathaushalte schaffen. Dabei wurde einerseits die Deckung des individuellen Strombedarfs aus Eigenerzeugung erhöht, andererseits eine große Zahl der von der Caterva GmbH entwickelten Energiespeichersysteme mit jeweils einer Leistung von 20 kW und einer Bruttokapazität von 21 kWh zu einem virtuellen Großspeicher vernetzt, der am Primärregelleistungsmarkt teilnahm, damit eine Stabilisierungsfunktion im Stromnetz übernahm und auch den ökonomischen Nutzen vergrößerte.

Die „Analyse energiewirtschaftlicher Erlöspotentiale eines elektrifizierten Busbetriebs mittels Simulation (eBus@Grid)“ wurde vom Lehrstuhl für Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) sowie die Juniorprofessur für Energieinformatik in einem Drittmittelprojekt für die N-ERGIE Aktiengesellschaft ausgeführt und analysierte die energiewirtschaftlichen Erlöspotentiale eines elektrifizierten Busbetriebs des Personennahverkehrs mittels Simulation. Dafür wurden das Betriebshofmanagement, die Disposition der Busse, die Durchführung der Fahrpläne und das Lademanagement modelliert, simuliert und unter Berücksichtigung energiewirtschaftlicher Aspekte optimiert. Ausgangspunkt war die bestehende Flotte der Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg (VAG) von 181 diesel- und erdgasbetriebenen Bussen, die in mehreren Stufen und unterschiedlichen Szenarien durch Elektrobusse ersetzt wurden.

Mit den Modellen wurde die zukünftige Ausgestaltung des Busdepots und der Dimensionierung des Netzanschlusses untersucht und die energiewirtschaftliche Flexibilität bestimmt.

Seit Anfang 2021 wird das Verbundprojekt „Mehrsektorale gekoppelte Energiesystemmodellierung auf regionaler Ebene (ESM-Regio)“ im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des BMWi im Bereich Technologieorientierte Systemanalyse durchgeführt. Die Koordination erfolgt durch den Lehrstuhl Informatik 7, weitere Partner sind an der FAU die Lehrstühle Wirtschaftsmathematik, Energieverfahrenstechnik und die Juniorprofessur Energieinformatik, die Hochschule Coburg, Institut für Hochspannungstechnik, die Stadtwerke Bayreuth, die Energieagentur Nordbayern sowie Bayern Innovativ. Hierdurch entsteht eine sehr sichtbare Zusammenarbeit zwischen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Akteuren im nordbayerischen Raum.

### 2.3.1 Life Cycle Assessment für die Bewertung des HP-ORC-Speicher-Systems

Es wurde ein Simulationsmodell des HP-ORC-Speicher-Systems entwickelt und in i7-AnyEnergy integriert. Das Modell umfasst die Abkühlungsvorgang gegenüber der Außentemperatur und auch das Ramp-Up und Ramp-Down Verhalten der Prozesse wurde in die Komponenten integriert. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Betriebsstatus wurde an das Verhalten der Versuchsanlage angepasst und die Komponenten mit den Kenngrößen für Niedertemperatur-Speicher (TP SP1-2) und HP-ORC-System (TP SP1-1) parametrisiert.

Das Simulationsmodell wurde um ein thermisches Schichtmodell des Wärmespeichers erweitert, das als parametrisierbare Komponente in i7-AnyEnergy integriert wurde. Das Modell berücksichtigt die sich auszubildenden Schichten durch Abkühlung und Betrieb innerhalb des Speichers, erhöht allerdings die Komplexität der Simulation. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass eine kontinuierliche Simulation notwendig ist um Phänomene innerhalb des Speichers nicht zu stark zu vernachlässigen. Eine Simulation von einem Jahr benötigte daher in etwa 40 Minuten. Im Rahmen des Projektes wurde es geschafft zu beweisen, dass eine diskrete Simulation für diese Art von gekoppeltem Speichersystem ausreichend ist [29]. Die Laufzeit wurde auf knapp 10 Sekunden pro Jahr reduziert, bei einer Abweichung der Ergebnisse zwischen kontinuierlich und diskret von weniger als 0,5%. Neben dem Vergleich zwischen kontinuierlicher und diskreter Simulation konnte das entwickelte Konzept mit Realdaten von der N-ERGIE validiert werden. Hierzu wurde die Simulation auf die Parameter und Betriebsdaten des Wärmespeichers in Nürnberg Sandreuth angepasst und simuliert. In kurzen Simulationszeiträumen von wenigen Tagen bis Wochen entsprachen die Ergebnisse der Simulation den Realdaten des Speichers, erst nach einem Betrieb von mehreren Monaten haben sich leichte Abweichungen ergeben. Diese Abweichungen sind allerdings zu vernachlässigen, da der Fokus der Pilotanlage auf einer täglichen Be- und Entladung liegt und nicht auf einer saisonalen Speicherung.

### 2.3.2 Anpassung der Simulationsmodelle für die thermischen Komponenten

In den Jahren Jahr 2018 und 2019 wurden Analysen und Vergleiche des Life Cycle Assessments für Batterie- und Wärmespeichersysteme durchgeführt [30]. Das HP-ORC-Speicher-System zeigte gegenüber den für kleinere Speicherkapazitäten genutzten Lithium-Batterien eine bessere Umweltverträglichkeit. Für größere Speicherkapazitäten werden in der Regel Bleisäure-Batterien genutzt, welche in vielen Kategorien ähnliche, teilweise bessere Umweltverträglichkeiten aufzeigen. Neben den „Umweltkosten“ für die reine Produktion des Speichersystems, sind ebenfalls die Einflüsse von Strom aus unterschiedlichen Quellen (Wind, PV, Strommix) über die Betriebsdauer untersucht worden.

In Verbindung mit einer deutschlandweiten Geothermiepotenzialanalyse wurde ebenfalls die Umweltverträglichkeit von Bohrstationen für Geothermieanlagen untersucht. In Abhängigkeit des Standorts sowie der thermischen Anforderungen, kann über die notwendige Bohrtiefe das LCA erstellt werden.

### 2.3.3 Integration des Speichersystems in einen Häuserverbund

Für die Untersuchung sehr großer Speicher (0,9 GWh bis 13 GWh) auf Grundlastfähigkeit in Verbindung mit PV und Wind, gekoppelt mit Geothermiestandorten, wurden Daten über diese Standorte in Deutschland ermittelt. In Zusammenarbeit mit dem Projekt KOSiNeK (Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext, durchgeführt durch die Juniorprofessur für Energieinformatik, den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, den Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme und den Lehrstuhl Informatik 7), wurde für Deutschland landkreisscharf und in stündlicher Auflösung der zur Verfügung stehende Überschussstrom bestimmt. Unter Einsatz dieser Daten für eine Auswahl geeigneter Landkreise und Einbindung der Strommarktpreise sowie der Investitionskosten, wurde eine Werkzeugkette zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit sehr großer Speicher zur Erbringung der Grundlast erstellt. Ein weiteres Ergebnis ist die Berechnung des möglichen CO<sub>2</sub> Einsparpotentials durch Einsatz des Speichersystems.

### 2.3.4 Untersuchung sehr großer Speicher auf Grundlastfähigkeit mit PV/Wind gekoppelt mit Geothermiestandorten

Es wurden verschiedene Szenarien für die Wirtschaftlichkeit des HP-ORC-Speicher-Systems zur Kühlung eines luftgekühlten Rechenzentrums untersucht. In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, wurden die Anlagenkomponenten an die niedrigen Abwärmtemperatures des Rechenzentrums angepasst, um damit die Kühlkomponenten des Rechenzentrums zu ersetzen. Die Daten für die abzuführende Wärmeleistung und das Temperaturniveau wurden einem Simulationsmodell des Rechenzentrums der noris network AG entnommen. Basierend auf der maximal möglichen PV Leistung auf dem Dach des Rechenzentrums der noris network AG zeigen die Simulationen, dass auf die konventionelle Luftkühlung nicht verzichtet werden kann, um einen durchgehenden Betrieb des Rechenzentrums zu gewährleisten. Weiterhin ist es aufgrund der niedrigen Stromkonditionen für ein Rechenzentrum nicht ratsam, den eigenen „kostenlosen“ PV Strom für eine Kühlung einzusetzen, welche deutlich mehr Strom verbraucht als die konventionelle Kühlung.

### 2.3.5 Untersuchung des Speichersystems in Verbindung mit einem Rechenzentrum

Für die kombinierte Dimensionierung und wirtschaftliche Bewertung der Integration des HP-ORC-Speicher-Systems in einen Hausverbund wurden die Simulationsmodelle erstellt. Zusätzlich wurden die Methoden zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit implementiert. Mit der entwickelten Werkzeugkette kann so die durch den Einsatz des Speichersystems erzielte Einsparung im Vergleich zu einem Häuserverbund ohne Speichersystem bei verschiedenen Stromkosten, Einspeisevergütungen, Anlagenparameter und Investitionskosten ermittelt werden.



Abbildung 21: Integration des Speichersystems in einen Häuserverbund mit PV-Installationen

Die Idee des in Abbildung 21 dargestellten Anwendungsfalls ist, dass überschüssiger Strom aus PV in der Carnotbatterie gespeichert anstatt an das Netz verkauft wird. Mithilfe der Simulation kann untersucht werden, für welche Größe der Community die geplante Pilotanlage wirtschaftlich am besten ist. Mit dem integrierten Teillastverhalten für Wärmepumpe und ORC, basierend auf den Ergebnissen vom LTT, und dem validierten Wärmespeichermodell, können der Einfluss von Parametern wie beispielsweise die Siedlungsgröße oder vorhandener PV-Fläche auf die Einsparungen mit dem System ermittelt werden. Eine grundlegende Erkenntnis für einen solchen Anwendungsfall ist, dass ein größerer Speicher nicht immer sinnvoller sein muss, sondern die notwendige Speicherkapazität stark von den Leistungen der Wärmepumpe und ORC abhängig ist [31]. Im Gegensatz zur chemisch gespeicherten Energie bei Batterien, ist die thermische Energie im Wärmespeicher verlustanfälliger. Ist der ORC für die betrachtete Speichergröße nicht passend

ausgelegt, bedeutet das, dass die gespeicherte Energie nicht komplett entladen werden kann und ein Teil somit über die Zeit hinweg durch Abkühlvorgänge verloren geht. In Abbildung 22 ist dieser Verlauf für die Parameter der Pilotanlage (20 kW Wärmepumpe und 7 kW ORC) und einer Siedlungsgröße von 40 Häusern für unterschiedliche PV Größen dargestellt.

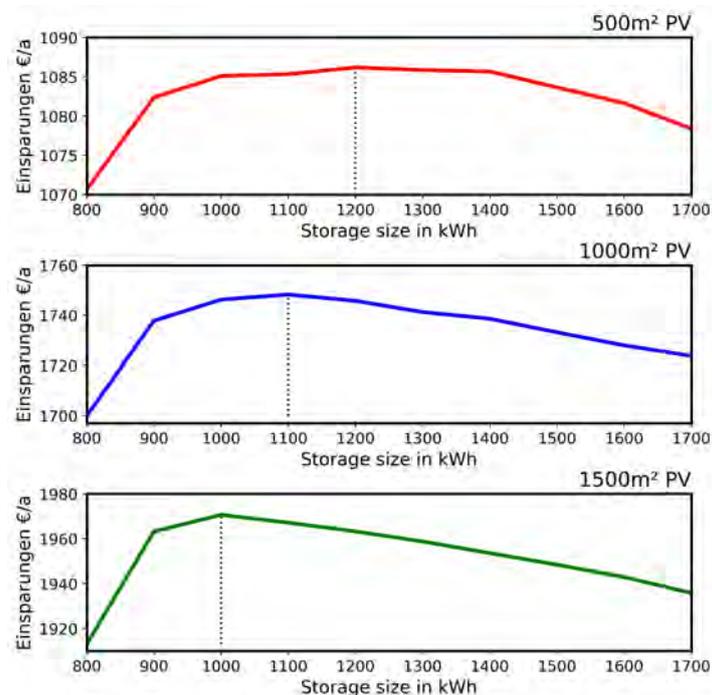


Abbildung 22: Einsparungen in Abhängigkeit von der Speichergöße der Pilotanlage (20 kW Wärmepumpe und 7 kW ORC) und einer Siedlungsgröße von 40 Häusern für unterschiedliche PV Größen

Basierend auf den Kosten der Pilotanlage können wirtschaftliche Szenarien für eine kleine Siedlung ermittelt werden, allerdings nicht unter den aktuell in Deutschland herrschenden Marktbedingungen. Ein wichtiger Bestandteil für einen wirtschaftlichen Betrieb der Pilotanlage ist eine sehr niedrige Einspeisevergütung als auch eine deutliche Reduktion der Investitionskosten der Anlage. Dem aktuellen Trend der Einspeisevergütung folgend, sollten die Marktbedingungen in wenigen Jahren in Deutschland erreicht sein. Die Kosten der Anlage sollten beim Erreichen der Marktreife ebenfalls deutlich reduzierbar sein, da die Kosten der Pilotanlage noch viele Elemente besitzt welche nur relevant für Forschung und Betrieb als Pilotanlage waren.

Als kurzer Exkurs wurde auch ein Proof-of-Concept für eine alternative Anwendungsmethode der gebauten Pilotanlage untersucht. Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, ein Gebäude mit Wärme, Kälte und Strom zu versorgen. Diese sogenannte Triple-Generation wurde anhand eines Bürogebäudes für einen latenten als auch sensiblen Wärmespeicher untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Speicherarten die Anwendung möglich ist, allerdings der latente Speicher deutliche Vorteile gegenüber dem sensiblen mit sich bringt [32].

### 3 Spitzenlastfähige Hochtemperatur-Speicher (SP2)

#### 3.1 Dynamische Speicherung von Überschussstrom in isothermen Heatpipe-Carbonatspeichern

*Christoph Lange, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)*

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik wurde in der Projektlaufzeit ein Konzept für den isothermen Heatpipe-Carbonatspeicher entwickelt, in verschiedenen Maßstäben erprobt und dessen Leistungsfähigkeit und Anwendungsfälle charakterisiert. Durch Heatpipes (Wärmerohre) in der Wirbelschicht wird der isotherme Betrieb des Carbonatspeichers ermöglicht und somit der Ein- und Austrag von Wärme weitaus effizienter und dynamischer, als dies mit herkömmlichen thermochemischen Speichern realisierbar ist.

##### 3.1.1 Entwicklung einer innovativen Beheizung (Beladung) und Dampferzeuger-Regelung (Entladung)

In einem ersten Schritt wurde ein innovatives Heizkonzept für die direkte elektrische Beheizung der Heatpipes mittels Hochtemperatur-Silicium-Carbid-Elementen (SiC) entwickelt, welches es erlaubt den Wärmeeintrag in den Reaktor ohne zusätzlichen Bauraum für eine externe Beheizung zu realisieren. Damit ist es möglich die Nutzung von Überschussstrom zur Beladung des Speichers nachzubilden. Das dafür notwendige Heatpipe-Design und die Einbausituation der Heizelemente wurden im Laufe des Projektes optimiert, sodass in der Pilotanlage im „Speicherhaus“ des EnCN eine maximale Leistungsübertragung bei der Beheizung von über 30 kW realisierbar ist. Das Konzept ist modular, damit gut geeignet für ein Up-Scale und ermöglicht eine flexible aber dennoch dynamische Beladung des Speichers bei wechselhaft zur Verfügung stehenden Überschussstrom.

Im Zuge der Konzeptionierung wurde weiterhin ein innovatives Heatpipe-Dampferzeuger-Konzept entwickelt, welches auf der regelbaren Isolierung des Dampferzeugers gegenüber der Heatpipe beruht. Dabei wird ein Regelstab in den Dampferzeuger eingeführt, um die Heatpipe im Speicherbetrieb sowie bei der Speicherbeladung gegenüber dem Dampferzeuger zu isolieren.

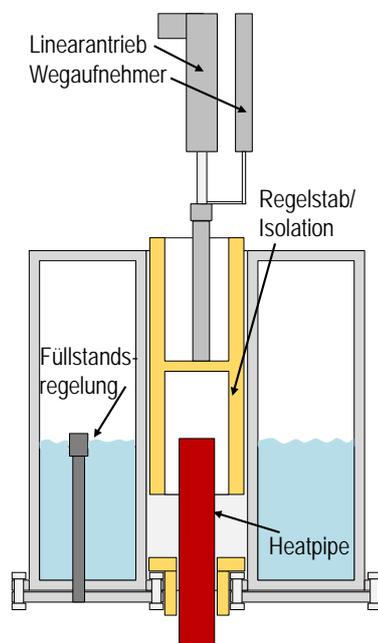
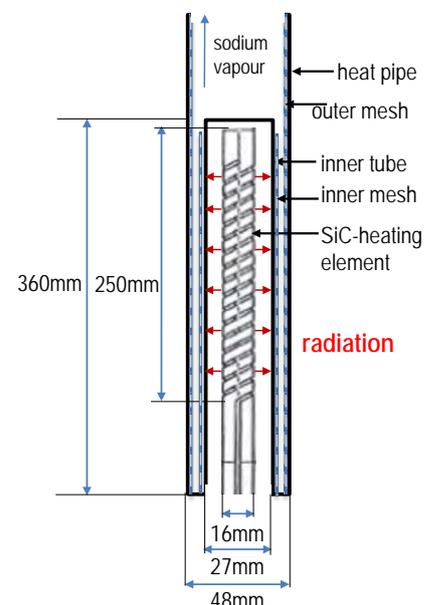


Abbildung 24: innovatives Heatpipe-Dampferzeuger-Konzept



Abbildung 23: links: heißes SiC-Element und Position in der Heatpipe; rechts: Heatpipe-Beheizung mit SiC-Element schematisch



### 3.1.2 Untersuchungen an der Thermogravimetrischen Analyse (TGA)

Untersuchungen an der TGA halfen die Prozessbedingungen und geeignete Sorbentien für den Carbonatspeicher zu charakterisieren und auszuwählen. Die Proben mit Korngrößen im Bereich von 0,1-0,5 mm der Firma Lhoist Rhein Kalk Germany wurden im Temperaturbereich von 800 °C bis 900 °C und bei CO<sub>2</sub>-Partialdrücken von 0-1 bar<sub>a</sub> (in Stickstoff) untersucht, stellenweise auch mit thermischer Vorbehandlung zur Verbesserung der Zyklenstabilität. Dabei wurde die Abnahme der zyklischen CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit nach den Ansätzen von Grasa [4] und Abanades [5] validiert, für kleinere Zykuszahlen sogar mit besseren Ergebnissen. Durch Messungen mit verschiedenen Partikelgrößen konnte ab dem vierten bis fünften Zyklus ein verbesserter Umsatz von kleineren gegenüber größeren Partikelgrößen festgestellt werden. Für die ersten drei bis vier Zyklen ist umgekehrtes Verhalten vorzufinden. Eine Veränderung des p<sub>CO2</sub> zeigte keinen Einfluss auf die Zyklenstabilität, jedoch auf die Reaktionsrate. Besonders bei der Karbonisierung machte sich eine bereits geringe Veränderung des CO<sub>2</sub>-Partialdruckes stark bemerkbar. Ein positiver Effekt durch thermische Vorbehandlung konnte nur für längere Verweilzeiten bei 900°C festgestellt werden (Abbildung 25).

Dadurch wurde die Auswahl der Partikelgröße auf den kleinstmöglichen Korngrößenbereich für den Betrieb mit einer Wirbelschicht (0,1-0,3 mm) für den Carbonatspeicher festgelegt, da hier eine höhere Materialausnutzung (CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit) möglich ist als mit größerem Material. Die thermische Vorbehandlung bei 900 °C zeigt Potential, dass das Material beim Aufheizen und ggf. Halten auf hoher Temperatur vor der ersten Kalzinierung keinen negativen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit erleidet.

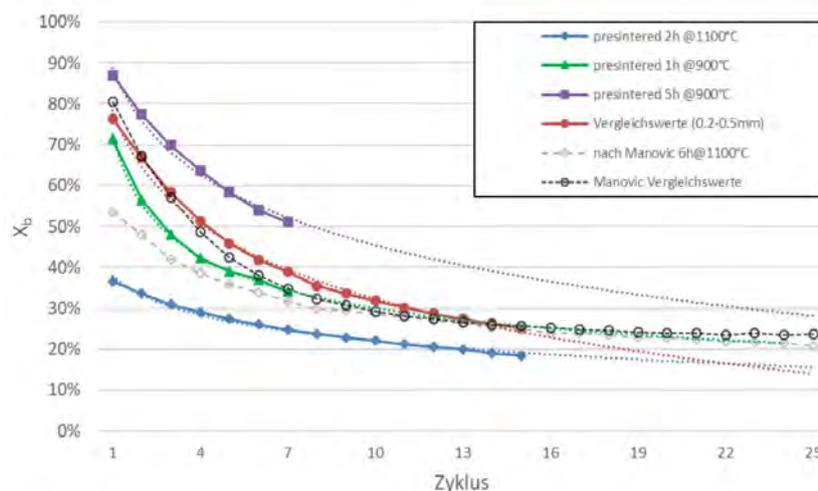


Abbildung 25: Messergebnisse thermisch vorbehandelter Proben im Vergleich zu einer Messung mit unbehandeltem CaCO<sub>3</sub> sowie unbehandeltem und für 6h bei 1100°C vorgesintertem CaCO<sub>3</sub> aus der Arbeit von Manovic et al. [6]

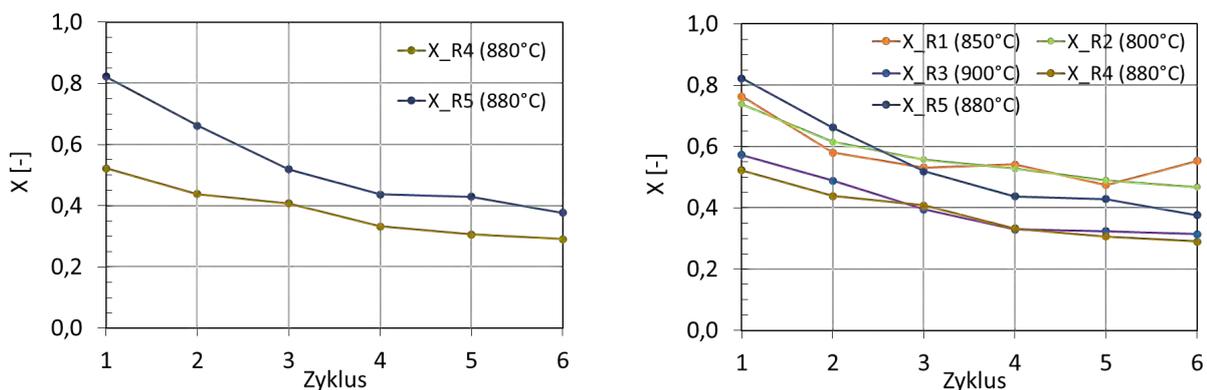
### 3.1.3 Versuchsreihen an der Laboranlage (Mini-Carbonatspeicher)

Am Mini-Carbonatspeicher wurden 5 Zyklenreihen durchgeführt, um insbesondere den Einfluss der Kalzinierungsbedingungen auf die zyklische CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit des CaO zu untersuchen. Im Rahmen der mittelneutralen Projektverlängerung wird auch noch der Einfluss von Wasserdampf untersucht. Der zu erwartende Einfluss verschiedener Partialdrücke und Temperaturen ist im Vergleich zu Sintereffekten bei der Kalzinierung durch die geringere Temperatur der Karbonisierung nach den TGA-Versuchen als gering einzuschätzen, wird allerdings in weiteren Versuchsreihen untersucht.

**Tabelle 3: Versuchsbedingungen für die Versuchsreihen 1 bis 5 am Mini-Carbonatspeicher**

Kalzinerung	R1	R2	R3	R4	R5
$T [^{\circ}\text{C}]$	850	800	900	880	880
$\dot{V}_{\text{N}_2} [\text{l}_\text{N}/\text{min}]$	20	30	15	15	15
Karbonisierung	R1	R2	R3	R4	R5
$T_{\text{soll}} [^{\circ}\text{C}]$	800	800	800	800	800
Beheizung	Ein	Aus	Aus	Aus	Ein
$\dot{V}_{\text{N}_2} [\text{l}_\text{N}/\text{min}]$	2	2	5 - 20	10 - 22	10-45
$\dot{V}_{\text{CO}_2} [\text{l}_\text{N}/\text{min}]$	20 - 30	30	30	30	40

In R5 konnte illustriert werden, dass durch das Halten der Wirbelschichttemperatur auf einem hohen Niveau über 740 °C eine vorzeitige Beendigung der Karbonisierung verhindert wird. Die resultierende Umsatzsteigerung und der Vergleich zu den Reihen 1 bis 4 sind in Abbildung 26 zu sehen.


**Abbildung 26: Zyklische CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit des CaO bei verschiedenen Versuchsreihen am Mini-Carbonatspeicher**

In der linken Grafik ist zu sehen, dass in allen Zyklen Umsatzsteigerungen ermöglicht wurden. Besonders stark ausgeprägt waren diese in den ersten beiden Zyklen. Über die sechs Zyklen konnte dadurch eine mittlere Umsatzsteigerung von 39,4 % im Vergleich zu R4 realisiert werden. Allerdings ist zu sehen, dass der Umsatz von anfangs 82,2 % bis Z6 auf 37,7 % fällt. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem die Umsatzeinbußen in den ersten drei Zyklen. Im rechten Diagramm sind die Umsätze aller bisherig durchgeführter Versuchsreihen aufgetragen. Durch die vollständige Karbonisierung erzielt R5 in den ersten beiden Zyklen die höchsten Umsätze. In den anderen Reihen sind die Umsatzeinbußen pro Zyklus geringer. Dadurch konnten in R1 und R2 ab Z3 trotz der unvollständigen Karbonisierung höhere Umsätze erreicht werden. Das verdeutlicht den Einfluss der Kalzinierungstemperatur und den damit verbundenen Sinterprozessen auf die Zyklenstabilität. Für einen quantitativen Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Kalzinierungstemperatur müssten die Reihen 1 bis 3 unter gleichen Karbonisierungsbedingungen wiederholt werden.

### 3.1.4 Weitere für das Up-Scale relevante Ergebnisse am Mini-Carbonatspeicher

#### 3.1.4.1 Einfluss der Reaktionstemperatur bei der Karbonisierung

Insbesondere gegen Ende der Karbonisierung stellten wir am Mini-Carbonatspeicher fest, dass die Reaktionsleistung schlagartig abnimmt. In Reihe 5 konnten wir zeigen, dass nur der erste Teil der Abnahme reaktionsbedingt ist. Abbildung 27 links verdeutlicht den Einbruch der Betttemperatur als Folge des Abfalls der Karbonisierungsleistung. Dieser Abfall wiederum verstärkt den Effekt des Einbruchs der Betttemperatur und limitiert dadurch die Kinetik der Reaktion im diffusionslimitierten Bereich stärker als die Diffusion selbst.

Der erste Einbruch der Reaktionsleistung wird auf das vollständige Verschließen aller Oberflächen-Poren zurückgeführt. Im Anschluss findet eine diffusionskontrollierte Reaktion mit langsamer Abnahme der Reaktionsleistung statt, wenn die Reaktionstemperatur konstant bleibt. Durch den hohen Anteil der Wärmeverluste des Mini-Carbonatspeichers auch bei inaktivem Dampferzeuger konnte die Reaktionstemperatur nur mit zusätzlicher Beheizung gehalten werden. In der Pilotanlage hingegen ist der Anteil der Verluste im Vergleich zur Karbonisierungsleistung deutlich geringer, sodass die Temperatur durch die Exothermie der Karbonisierung konstant gehalten werden kann und somit die Leistungsabgabe bei der Entladung noch eine längere Zeit auf einem ausreichend hohen Leistungsniveau verbleibt. Das ermöglicht eine bessere Ausnutzung der CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit des Speichers bei der Karbonisierung und somit eine größere Zyklenstabilität und Speicherkapazität (siehe Abbildung 26 links).

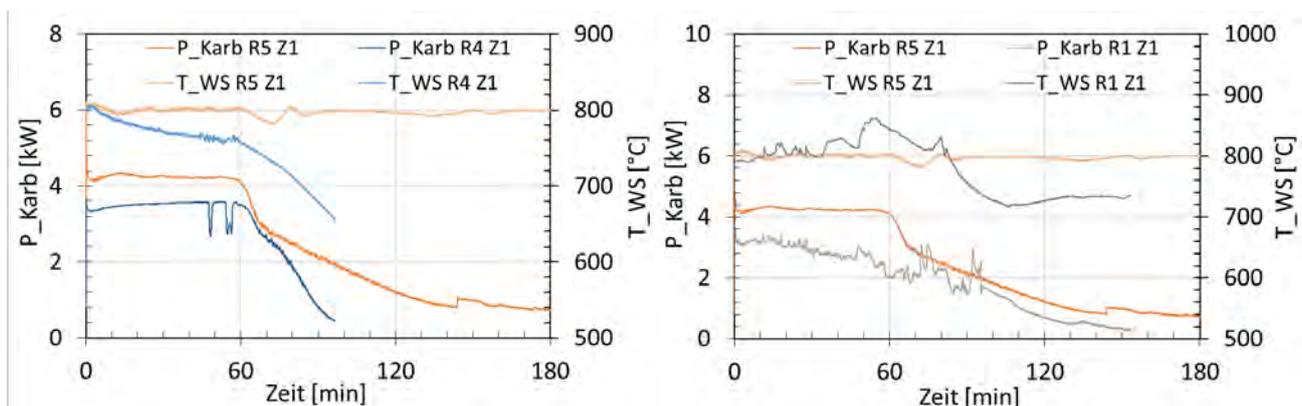


Abbildung 27: Betttemperatur und Karbonisierungsleistung: Erster Zyklus aus Reihe 4 und 5 (links), aus Reihe 1 und 5 (rechts).

#### 3.1.4.2 Einfluss der Reaktionstemperatur und der Fluidisierung bei der Karbonisierung (Entladung)

Abbildung 27 rechts zeigt die Karbonisierungsleistungen des jeweils ersten Zyklus von R1 und R5. In Reihe 1 wurde die Betttemperatur immer über 720 °C gehalten, bei R5 immer um 800 °C. Reihe 1 war durchweg im Festbett, da als Inertgas nur 2 l<sub>N</sub>/min N<sub>2</sub> zugegeben wurden, während in Reihe 5 durchgängig fluidisiert wurde durch die Zugabe von bis zu 30 l<sub>N</sub>/min N<sub>2</sub>. Die Reaktionsleistungen von Reihe 5 sind etwas höher, da dort 40 statt 30 l<sub>N</sub>/min zugegeben wurden, der Trend ist dennoch vergleichbar.

Die Unstetigkeit und von Beginn ab leicht sinkende Reaktionsleistung in R1 ist der mangelnden Durchmischung des Bettes und nicht ausreichendem Wärmeabtransport geschuldet. Die Leistungsniveaus weichen im reaktionslimitierten Regime stark voneinander ab, wohingegen sie ab dem Übergang ins diffusionslimitierte Regime von R5 relativ ähnlich sind. Eine merkliche Leistungssenkung trotz des Temperatureinbruchs nach 72 min ist in R1 nicht zu sehen. Ab 105 min steigt die Temperatur bis zum Reaktionsende wieder auf 740 °C. In diesem Bereich ähneln sich die Profile trotz eines Temperaturunterschieds von 60 °C. Daraus kann geschlossen werden, dass im diffusionslimitierten Bereich Temperaturen bis 740 °C realisierbar wären, ohne die Reaktionsleistung merklich zu beeinträchtigen.

Anhand dieser Ergebnisse konnte die minimale Reaktionstemperatur der Karbonisierung für den Pilot-Carbonatspeicher auf mindestens 720 bis 740 °C festgelegt werden. Außerdem lässt sich klar die Notwendigkeit einer ausreichenden Fluidisierung für eine effiziente Regelung der Entladung aufzeigen.

### 3.1.4.3 Effizienz der Beladung bei pulsierendem und stationärem Wirbelschichtbetrieb der Kalzinierung

In Abbildung 28 werden die Reaktionsleistungen verschiedener Zyklen mit den jeweiligen Temperaturen gegenübergestellt. In R4 Z7 war die Temperatur deutlich höher als in der vorherigen Kalzinierung, weshalb noch R3 Z2 in den Vergleich hinzugezogen wird.

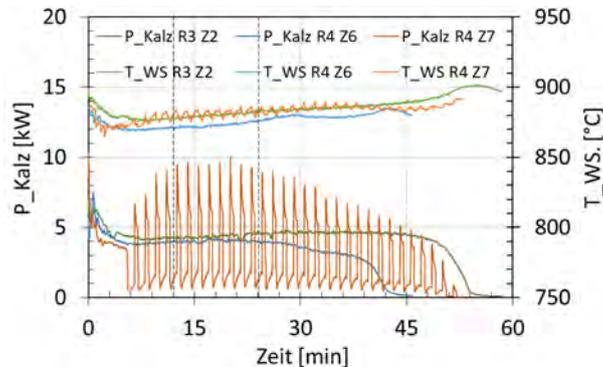


Abbildung 28: Kalzinierungsleistungen und Wirbelschichttemperaturen stationärer (R3 Z2, R4 Z6) und pulsierender Kalzinierung (R4 Z7)

Für den Vergleich der Versuche wurde jeweils der Zeitraum 12 bis 24 min (8 Pulse) mit nahezu konstanten periodischen Reaktionsleistungen gewählt. In Tabelle 5 wurden die spezifische  $\text{CO}_2$ -Freisetzung und die spezifische Energieeinspeicherung pro kg  $\text{N}_2$  und pro kWh Heizleistung bestimmt. Die Energieeinspeicherung konnte bei einer Pulsation bei gleicher Temperatur um 48 % gesteigert werden. Eine pulsierende  $\text{N}_2$ -Zufuhr könnte demnach durchaus den Energie- und Gasverbrauch bei der Kalzinierung senken. Die absolute Freisetzung pro Sekunde ist bei Pulsation jedoch geringer, wodurch längere Beladedauern prognostiziert werden. Das ist aber für den Fall von geringeren zur Verfügung stehenden Beladeleistungen eine vielversprechende Alternative.

Tabelle 4: Spezifische  $\text{CO}_2$ -Freisetzung pro zugeführter Heizleistung und Inertgasmenge stationärer und pulsierender Kalzinierungen im Zeitintervall 12 bis 24 min.

	R4 Z6	R4 Z7	R3 Z2
Mittlere Wirbelschichttemperatur [°C]	873	881	880
Spez. $\text{CO}_2$ -Freisetzung [kg $\text{CO}_2$ /(kg $\text{N}_2$ kWh)]	1,80	2,88	1,94
Spez. Energieeinspeicherung [kWh Kalz]/(kg $\text{N}_2$ kWh)]	1,88	2,99	2,02

### 3.1.5 Proof-of-Concept des Pilot-Carbonatspeichers im 250 kWh Maßstab

Im Jahr 2021 wurde der Pilot-Carbonatspeicher im „Speicherhaus“ des EnCN in Betrieb genommen, um dort den Proof-of-Concept in einer relevanten Größenordnung und ohne zu große Randeffekte realisieren zu können.

Tabelle 5: Parameter der am EnCN im Betrieb befindlichen Versuchsanlagen des innovativen Carbonatspeichers

	Mini-Carbonatspeicher	Pilot-Carbonatspeicher
Reaktorgröße	Ø 158 mm, Höhe: 1200 mm, 1 HP	Ø 498 mm, Höhe: 2000 mm, 12 HPs
Speicherkapazität	6 kWh Karbonisierung	250 kWh Karbonisierung
Maximale Entladeleistung	2,5 kW Dampf $\approx$ 4 kW Karb.	30 kW Dampf $\approx$ 35 kW Karb.
Ausgangsmasse $\text{CaCO}_3$	20 kg	300 kg

Medienzufuhr über MFC	bis 50 l <sub>N</sub> /min = 3 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h N <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> /Luft bis 2 kg/h Dampf	bis 30 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h CO <sub>2</sub> , 60 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h N <sub>2</sub> /Luft bis 10 kg/h Dampf
Messung CO <sub>2</sub> Strom	Gasanalysator (GA)	GA / therm. Durchflussmesser

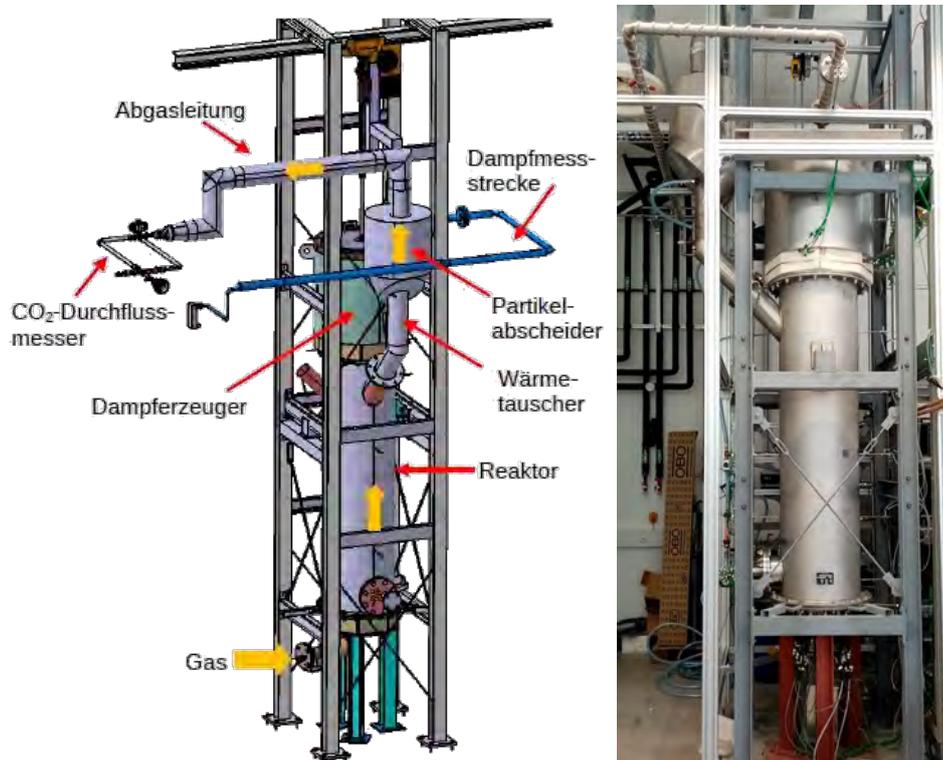


Abbildung 29: Pilot-Carbonatspeicher: links in CAD, rechts aufgebaut im Speicherhaus

Im November 2021 wurde die Inbetriebnahme abgeschlossen mit einem Versuch zum Kartieren der Dampferzeugerleistung abhängig von Steuerstabposition und Betttemperatur im Reaktor. Dabei wurde für die kommenden Versuche die maximale Leistungsübertragung in den Dampferzeuger bestimmt (25 kW), welche bei allen anvisierten Karbonisierungstemperaturen > 750 °C erreicht werden kann. Mit den daraus bestimmten Korrelationen kann je nach Temperatur die notwendige Steuerstabeinstellung gewählt werden, sodass eine Limitierung der Wärmeübertragung auf Dampferzeugerseite ausgeschlossen werden kann.

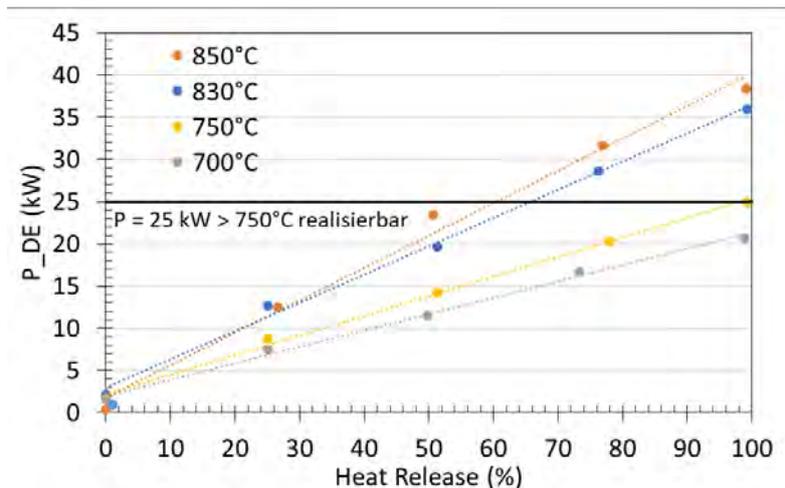


Abbildung 30: Dampferzeugerleistung abhängig von Karbonisierungstemperatur und Steuerstabeinstellung (% der Leistungsfreigabe an den Dampferzeuger)

In den nun folgenden Versuchen soll die erzielbare Dampferzeugerleistung abhängig von den Karbonisierungsbedingungen aufgezeichnet werden, um über den Pilot-Carbonatspeicher eine Charakterisierung des Speicherkonzepts für einen zukünftigen Anlagenbetrieb im industriellen Umfeld zu erreichen.

Die Arbeiten zur Demonstration und zum Proof-of-Concept werden plangemäß innerhalb der mittelneutralen Projektverlängerung abgeschlossen.

### 3.1.6 Thermodynamische Simulationen zur Bewertung der Effizienz des Carbonatspeichers

#### Vergleich von Einspeisepunkten am Heizkraftwerk Sandreuth

Zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten des Carbonatspeichers in Kraftwerksschaltungen wurde eine thermodynamische Simulation verschiedener Einspeisepunkte am Heizkraftwerk Sandreuth mittels IPSEPro realisiert. 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:

Tabelle 6: 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	115 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

Abbildung 31 zeigt Ergebnisse der Frühlingssimulation. Bei einer Einspeisung von 20 MW Dampf auf 115 bar Niveau ist eine maximale Leistungssteigerung des Kraftwerks von 6 MW möglich. Am effizientesten ist die Einspeisung auf der 115 bar Schiene, danach folgt die 72 bar Schiene und die Einspeisung in die Gasturbine. Mit absteigendem Druck der Einspeisung sinkt auch die Effizienz. Die Gesamtwirkungsgrade des eingespeisten Dampfes liegen abgesehen von 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 Abhitzekeessel verloren, sodass nicht die komplette Wärme genutzt werden kann.

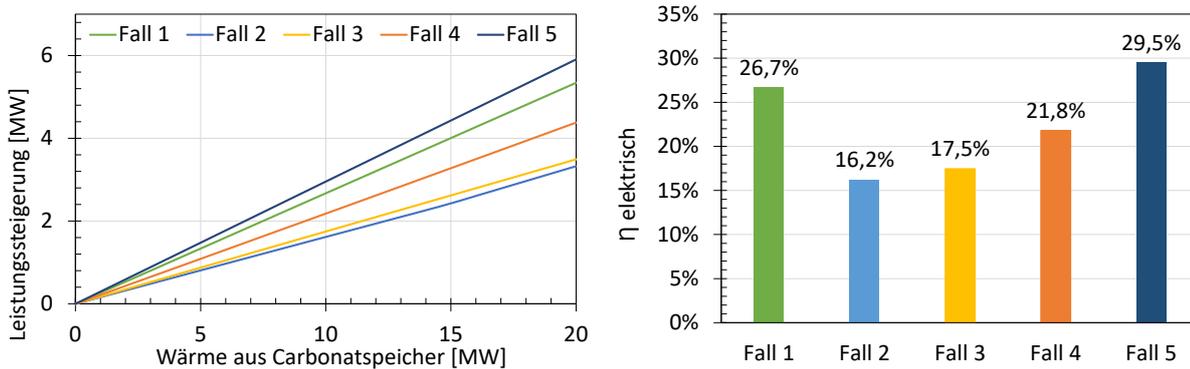


Abbildung 31: links: el Leistung bei steigender Einspeiseleistung, rechts: el. Wirkungsgrad bei 20 MW Dampferzeugung an verschiedenen Positionen im Kraftwerk

### Untersuchung des Einflusses verschiedener Reaktionsparameter auf den Wirkungsgrad des Carbonatspeichers

In einer einfachen Kraftwerksschaltung wurden am Carbonatspeicher Karbonisierungstemperatur und Kalzinierungstemperatur variiert, um einen theoretischen Power-to-Power Wirkungsgrad (orange) und einen Power-to-Steam (PtS) Wirkungsgrad (blau) zu errechnen. Der Power-to-Steam Wirkungsgrad ist maßgeblich, da dieser angibt, wie viel Prozent der bei der Beladung genutzten elektrischen Energie bei der Karbonisierung in Dampf verfügbar sind. Die Energie kann im Anschluss zur Erzeugung von erneuerbarem Strom genutzt werden oder aber zur Nutzung als Fernwärme.

Allerdings ist dieser simulierte Wirkungsgrad noch völlig unabhängig von praktischen Einflüssen wie der zyklischen  $\text{CO}_2$ -Aufnahmefähigkeit (vgl. Abbildung 26) oder der  $\text{CO}_2$ -Absorptionsrate (stark temperaturabhängig vor allem im diffusionslimitierten Bereich, s. Abbildung 27). Deshalb müssen bei der Interpretation des Diagramms in Abbildung 32 diese Einflüsse berücksichtigt werden.

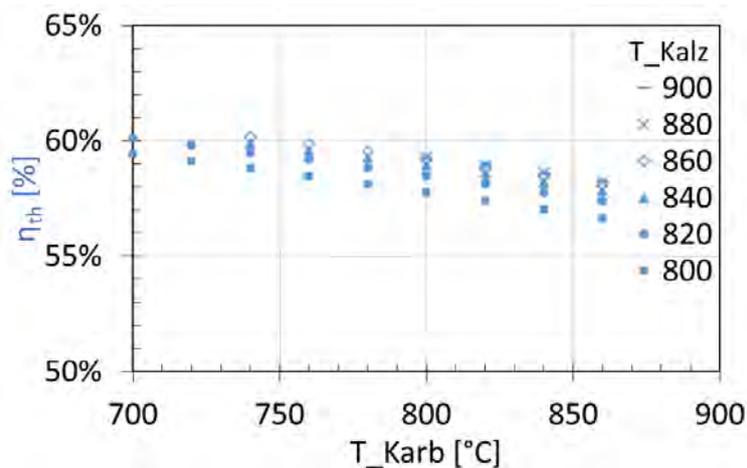


Abbildung 32: Power-to-Steam Wirkungsgrade des Carbonatspeichers in einer einfachen Kraftwerksschaltung

Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, steigt der PtS-Wirkungsgrad mit höheren Kalzinierungstemperaturen. Allerdings ist eine Steigerung der Kalzinierungstemperatur über 860 °C ohne großen Effekt. Deshalb wird die maximale Kalzinierungstemperatur für die Versuche im Pilot-Carbonatspeicher auf 860 °C festgelegt, da bei höheren Temperaturen die zyklische CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit durch Sintern sehr stark abnimmt (vgl. Abbildung 26).

Weiterhin ist ein positiver Effekt von niedrigen Karbonisierungstemperaturen zu erkennen. Aufgrund der o.g. kinetischen Limitierung bei Reaktionstemperaturen unter 720-740 °C wird die minimale Karbonisierungstemperatur zu 740 °C festgelegt bzw. in weiteren Versuchen nochmals validiert.

Die Simulation wird bis zum Ende der mittelneutralen Projektverlängerung noch erweitert um o.g. Einflüsse abzubilden und daraus Kennfelder für dein Up-Scale des Carbonatspeichers in industrielle Größenordnungen zu ermöglichen.

### 3.1.7 Strategische Entwicklung im Forschungsbereich

Die Entwicklung eines Carbonatspeichers am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik knüpft eng an vorhergehende Forschungen im EU-Projekt CARINA an, in dem Kalziumoxid als Mittel zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas von Kraftwerken benutzt wurde. Die zyklische Karbonierung (CO<sub>2</sub>-Abscheidung) und Kalzinierung (Regeneration des Sorbents) wurde in enger Kooperation mit der TU Darmstadt vorangetrieben, wo eine 300 kW<sub>th</sub> Pilotanlage errichtet wurde. Die Kernkomponenten der Wärmeübertragung, natriumgefüllte Hochtemperatur-Heatpipes, wurden am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik entwickelt und nehmen auch im Rahmen des EnCN Teilprojekts „Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher“ eine Schlüsselrolle ein.

Im Jahr 2019 wurde das auf europäischer Ebene angesiedelte Projekt ANICA vom ACS-Board bewilligt, welches sich unter Koordination der TU Darmstadt mit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Zementproduktion beschäftigt. Dieses Projekt baut auf die Erfahrung und Ergebnisse von CARINA und diesem Teilprojekt im EnCN. Am EVT wird dabei seit 01.01.2020 die Reaktorentwicklung sowie die Entwicklung von effizienten Wärmeübertragern vorangetrieben, um insbesondere die Sorbentregeneration (Kalzinierung) zu optimieren. Für diese Aufgaben konnte eine neue wissenschaftliche Mitarbeiterin gewonnen werden, welche den Schwerpunkt Carbonate Looping am EnCN weiter vertiefen soll.

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

*André Karl, Andres Osvet, Christoph Brabec (iMEET/ZAE)*

### 3.2.1 Simulation der Wärmeverteilung im CaCO<sub>3</sub>-Behälter:

Um die Wärmeverteilung in einem CaCO<sub>3</sub> Bett näherungsweise zu bestimmen wurden FEM Simulationen mit COMSOL Multiphysics durchgeführt. Der relevante Parameter für die Wärmeverteilung in dem Reaktor ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Für das granulare Material existieren keine Literaturwerte weshalb der Wert experimentell bestimmt werden müsste. Da die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur des Mediums skaliert, müsste man diese auch bei höheren Temperaturen (ca. 600-1000°C) bestimmen. Deshalb ist die experimentelle Bestimmung nicht trivial. Um einen approximierten Wert für die Wärmeleitfähigkeit bei ca. 900°C zu erhalten wurden theoretische

Werte berechnet. Dazu wurde das sog. „Maxwell model“ verwendet <sup>[1]</sup>. Der so errechnete Wert betrug 0,0727 W/(m\*K) bei 25°C und 0,1636 W/(m\*K) bei 900°C. Der Wert bei 900°C wurde für die Approximation der Wärmeleitfähigkeit des Carbonatbettes verwendet. Für diese Simulation wurde das Carbonatbett als Feststoff mit einer bestimmten festen Wärmeleitfähigkeit behandelt. Alternativ könnte das Carbonatbett auch als ein poröses System behandelt werden um eventuell ein genaueres Bild zu erhalten.

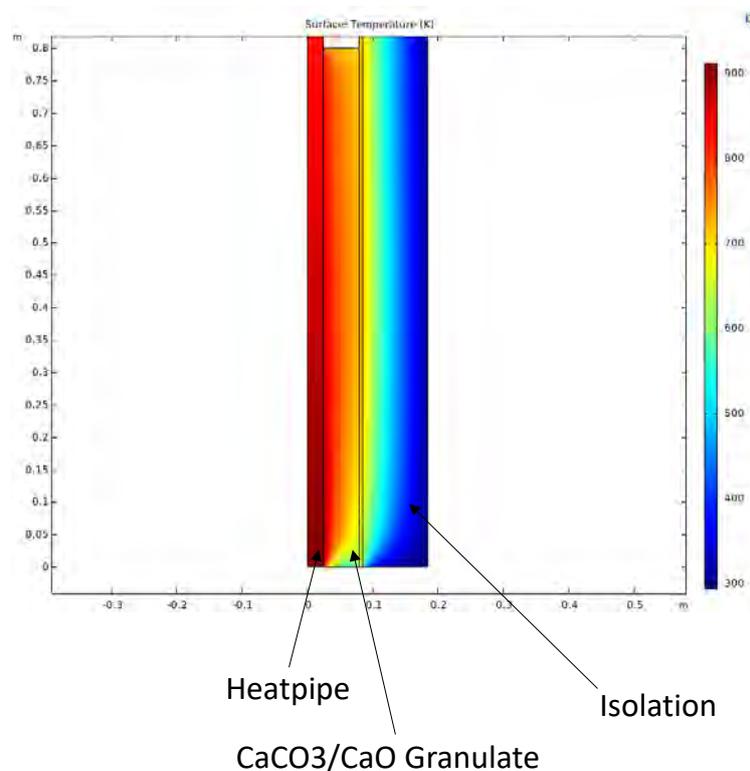


Abbildung 33: Simulation der Wärmeverteilung im  $\text{CaCO}_3$  Bett eines Wärmespeicherreaktors (Querschnitt) im thermischen Gleichgewicht. Für die Heizleistung der Heatpipe wurden 2000 W angenommen. Für die Wärmeleitfähigkeit der Stahlwand wurden 19 W/(m\*K) angenommen, für die Wärmeleitfähigkeit der isolierenden Wand wurden 0.03 W/(m\*K) angenommen.

Aus der Simulation wird klar, dass die Wärmeverteilung im Reaktor nicht gleichmäßig ist. Vor allem ist die Temperatur an der Oberfläche des Reaktors nicht gleich der Temperatur im Inneren des Reaktors. Dies bedeutet, dass eine thermographische Messung des Reaktors kein vollständiges Bild über die Wärmeverteilung im ganzen System geben würde, sondern nur über die Temperatur an der Oberfläche. Aus diesem Grund sollten die thermographischen Messungen mit Simulationen der inneren Wärmeverteilung ergänzt werden, um ein vollständigeres Bild der Situation zu erhalten.

### 3.2.2 Messung der Wärmeleitfähigkeit von granularem $\text{CaCO}_3$ :

Um die Simulationen der Wärmeverteilung im Reaktor durchzuführen wurde wie zuvor erwähnt zunächst ein errechneter theoretischer Wert der Wärmeleitfähigkeit verwendet. Idealerweise würde man diesen Wert jedoch auch experimentell bestimmen da für die Berechnung des theoretischen Wertes zum einen einige Annahmen (reines  $\text{CaCO}_3$ , bestimmte Temperatur, etc.) gemacht werden, und zum anderen jeder mit dem Modell errechnete Wert generell vom echten Wert abweicht.

Zur experimentellen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde die sog. „Hot-Wire“ Methode verwendet <sup>[2]</sup>. Hierbei wird ein dünner Draht (Platin) resistiv erhitzt mit einer vorher festgesetzten Stromstärke. Abhängig vom Wert der Wärmeleitfähigkeit des Materials in direkter Umgebung des Drahtes steigt die elektrische Spannung (V) mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Aus der graphischen Auftragung von  $\Delta V$  gegen die Zeit  $t$  kann nun die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Mediums bestimmt werden. Abbildung 35 zeigt den Messaufbau für die „Hot-Wire“ Messungen. Als

Stromquelle und Elektrometer für die Messungen wurden ein Keithley 2200 Gleichstromnetzteil und ein Keithley 6514 Elektrometer respektive genutzt. Die Messung der Daten erfolgte über ein selbst erstelltes LabVIEW Programm.

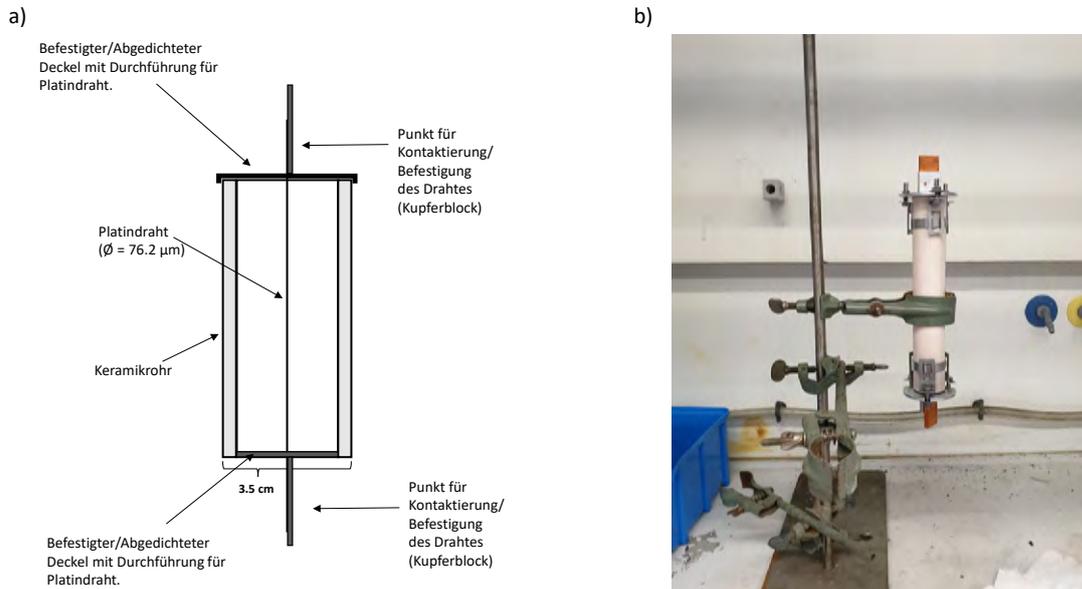


Abbildung 34: a) Schematische Übersicht des "Hot-Wire" Messaufbaus. b) Bild des Messzylinders

Der Messaufbau wurde zunächst mit deionisiertem Wasser bei Raumtemperatur getestet. Es konnte so ein Wert für die Wärmeleitfähigkeit von  $0,6287 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  bestimmt werden. Dieser Wert liegt zufriedenstellend nahe am Literaturwert für deionisiertes Wasser von ca.  $0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass der Messaufbau richtige Ergebnisse für die Werte der Wärmeleitfähigkeit liefert.

Für das granulare  $\text{CaCO}_3$  wurden zunächst Messungen bei Raumtemperatur durchgeführt. Die ermittelten Werte können hierbei zum Teil stark voneinander abweichen, je nachdem wie der Fit der Daten durchgeführt wird. Der beste Fit der Daten ergab einen Wert von ca.  $0,0823 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , welcher relativ nah am zuvor berechneten Wert von  $0,0727 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  liegt.

Zusätzlich wurde noch versucht, mit dem Messaufbau bei höheren Temperaturen von  $100^\circ\text{C}$  und  $150^\circ\text{C}$  in einem Ofen zu messen, um eventuell so die Werte bei den Arbeitstemperaturen von ca.  $900^\circ\text{C}$  zu extrapolieren. Leider hat der Messaufbau bei höheren Temperaturen keine verlässlichen Ergebnisse geliefert.

### 3.2.3 Bildgebende Messung der Temperatur: vorläufige Tests und Kalibrierung:

Bevor Messungen am Reaktor durchgeführt werden können, mussten zunächst einige vorläufige Tests durchgeführt werden. Zuerst musste die richtige Kamera gewählt werden, um die Messungen durchzuführen. Eine klassische Wärmebildkamera mit InSb Detektor (FLIR A8200Sc,  $1024 \times 1024$ ) wurde zunächst in Betracht gezogen, welche sensitiv im Wellenlängenbereich zwischen  $3$  und  $5 \mu\text{m}$  ist. Da am Reaktor jedoch durch eine Glasscheibe gemessen werden muss, kann diese nicht verwendet werden, da die Glasscheibe in genau diesem Wellenlängenbereich keine ausreichende Transmission besitzt.

Stattdessen soll nun eine wissenschaftliche Kamera mit Siliziumdetektor (Greateyes  $1024 \times 1024$  BI MID) verwendet werden. Diese muss erst kalibriert werden, damit sie nur arbiträre Intensitätswerte anzeigt und nicht die tatsächliche Temperatur. Da diese Kamera aber im Wellenlängenbereich zwischen  $600$  und  $1000 \text{ nm}$  sensitiv ist, ist sie geeignet, um durch die Glasscheibe zu messen.

Um Messungen bei höheren Temperaturen zu testen, wurde ein spezieller Testaufbau erstellt bestehend aus einem Rohrofen in dem ein Keramiktiegel platziert wurde. Der Keramiktiegel wurde mit  $\text{CaCO}_3$  Granulat gefüllt und über den Rohrofen aufgeheizt. Die verwendete Kamera kann über eine optische Schiene fest platziert werden und über einen  $45^\circ$

Goldspiegel in den Rohrofen hinein messen. Die Temperatur im Tiegel wurde mit der FLIR Wärmebildkamera und einem darin platzierten Thermocouple gemessen. Der gesamte Messaufbau wird in Abbildung 35 gezeigt.

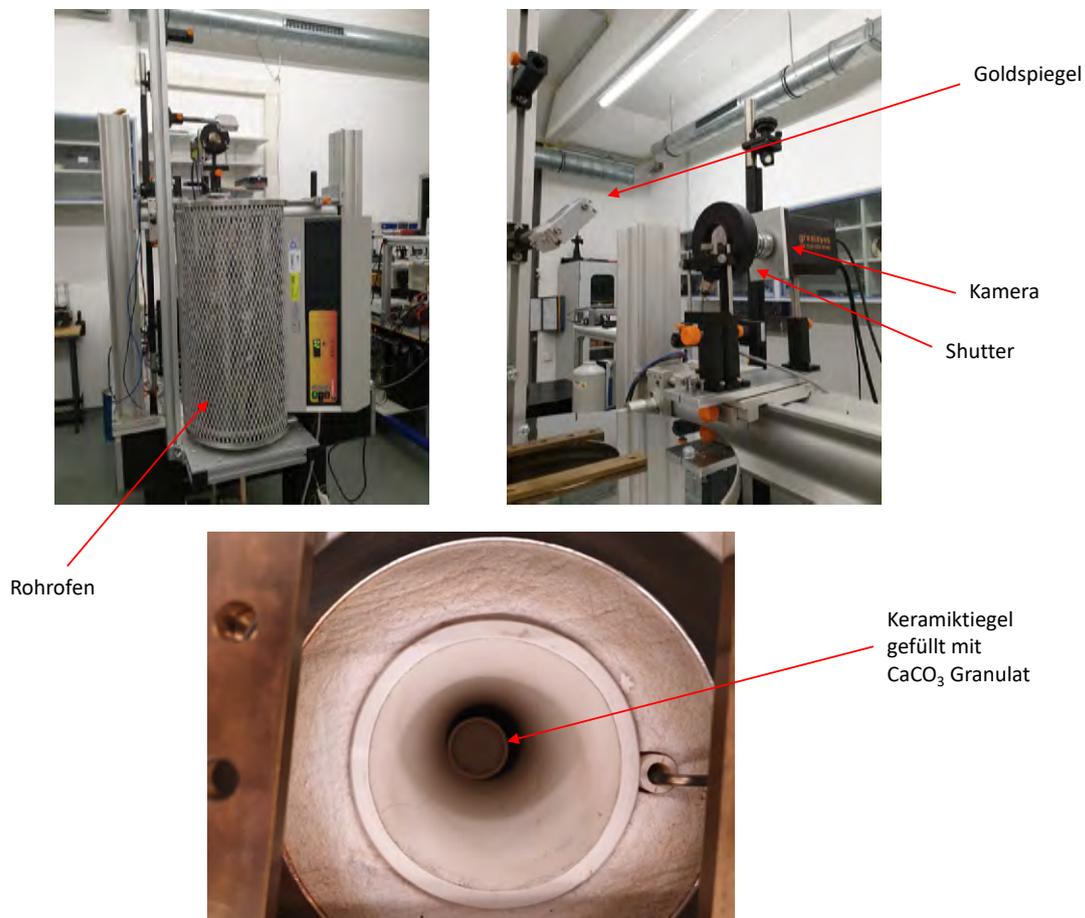


Abbildung 35: Bilder des verwendeten Messaufbaus mit Rohrofen und Keramiktiegel

Da in dem Messaufbau ein Goldspiegel verwendet wird wurde zunächst getestet, wie hoch der Verlust des Signals über den Spiegel ist. Nach den Spezifikationen des Händlers sollte der Reflexionsgrad des Spiegels in relevanten Bereich bei über 96% liegen (Abbildung 36). Es zeigte sich, dass bei einer Messung über den Spiegel die Temperatur um ca. 1,5% unterschätzt wird (Abbildung 37).

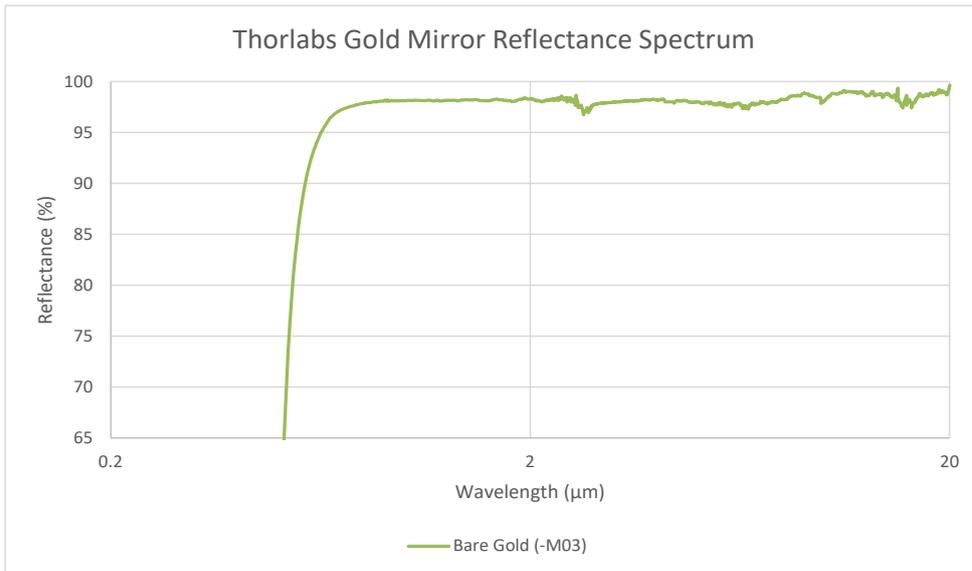


Abbildung 36: Spektrum des Reflexionsgrads des verwendeten Goldspiegels. Daten stammen von der Website des Händlers ([https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=744](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=744))

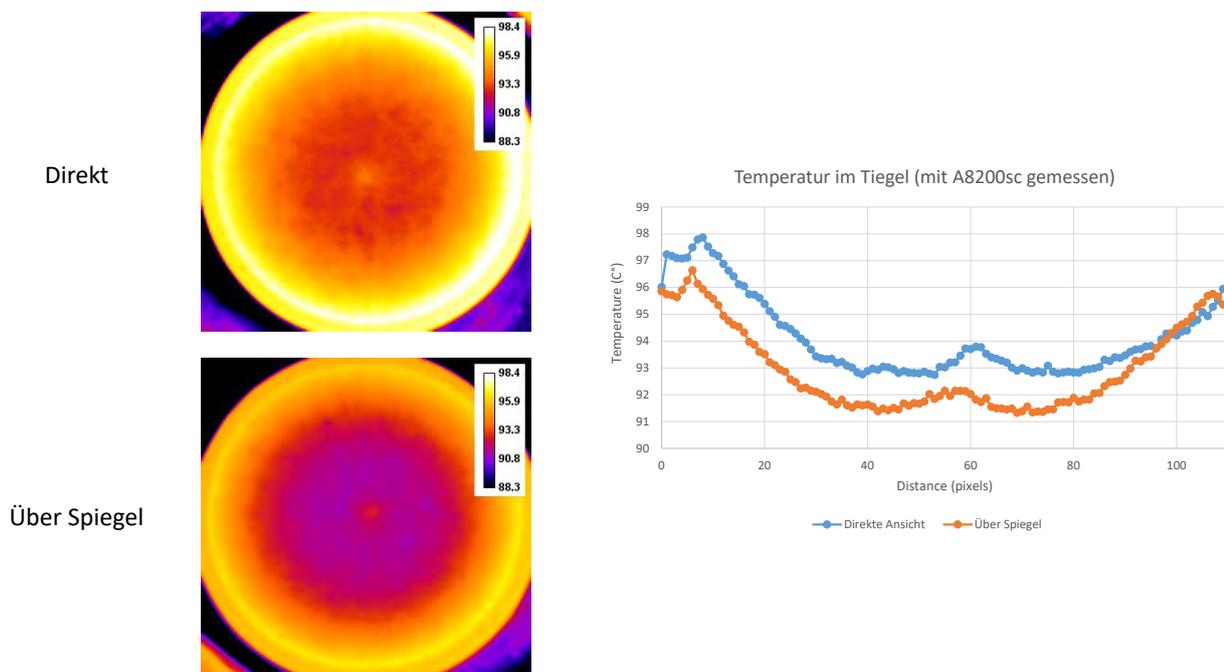


Abbildung 37: Messung der Temperatur mit FLIR A8200sc Kamera über einen Goldspiegel und direkt.

Danach wurden noch Messungen mit beiden Kameras bei Temperaturen zwischen 400°C und 550°C durchgeführt (Abbildung 38f.). Die Messungen zeigen, dass bereits bei diesen Temperaturen die Kamera mit Siliziumdetektor genügend Signal aufnehmen kann um ein Bild aufzunehmen. Das Signal ist sogar so hoch, dass selbst bei kurzen Integrationszeiten (< 100 ms) ein geeigneter Filter der das Signal verringert eingesetzt werden sollte sobald bei den Arbeitstemperaturen des Reaktors gemessen wird.

Keramiktiegel  
gefüllt mit  
 $\text{CaCO}_3$  Granulat

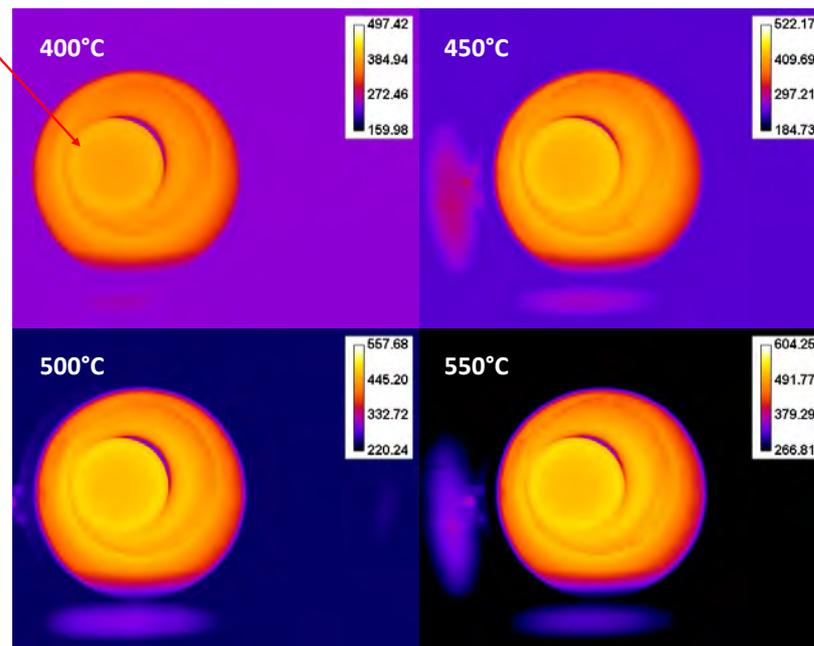


Abbildung 38: Messungen von Tiegel im Rohrofen mit FLIR A8200sc Kamera zwischen 400 und 550°C. Farbskala zeigt Temperaturunterschiede.

Keramiktiegel  
gefüllt mit  
 $\text{CaCO}_3$  Granulat

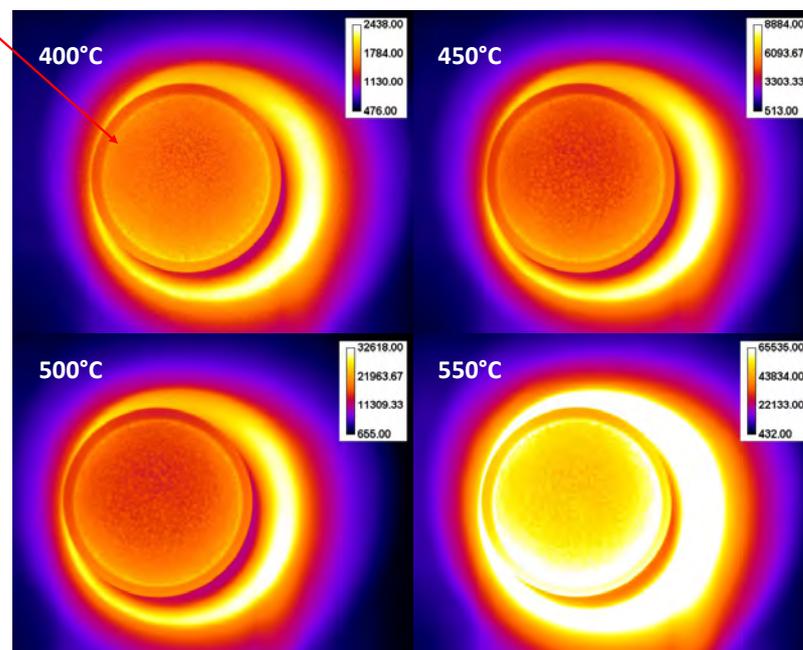


Abbildung 39: Messungen von Tiegel im Rohrofen mit Greateyes 1024 BI MID Kamera zwischen 400 und 550°C. Farbskala zeigt arbiträre Intensitätsunterschiede.

Mittels der bestimmten Temperatur, entweder bildgebend mit der FLIR Kamera oder gemessen über ein Thermocouple, und den Bildern der Greateyes Kamera, kann nun eine Kalibriergerade erstellt werden (Abbildung 40). Diese Kalibriergerade ist allerdings nur gültig für die verwendeten Bedingungen (Integrationszeit, Filter, Glas, etc.) und muss neu aufgenommen werden sobald die exakten Bedingungen für die Messung am Reaktor festgelegt wurden.

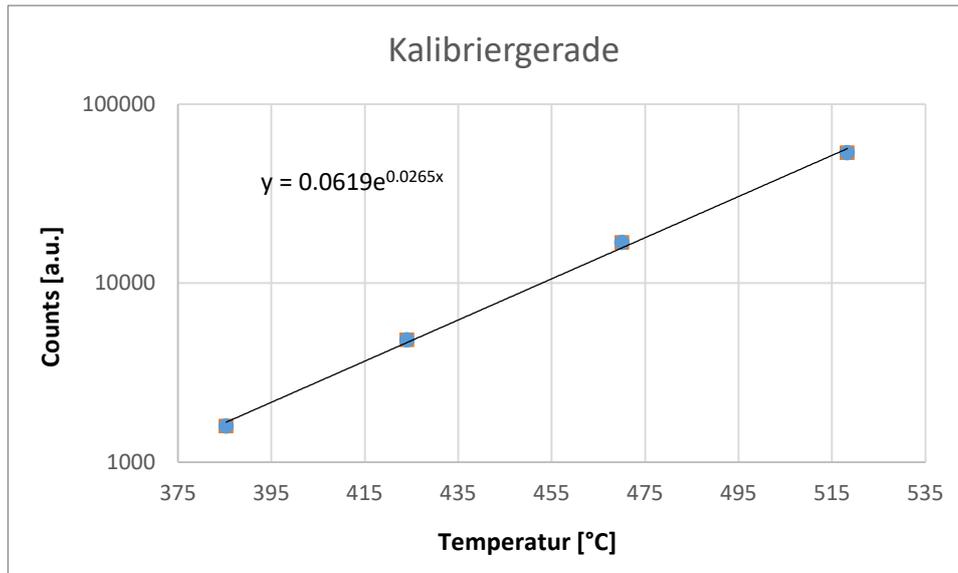


Abbildung 40: Kalibriergerade für die Korrelation von Greateyes 1024 BI MID gemessenen Counts und der tatsächlichen Temperatur.

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

Jan Sebastian Hildebrand, Wolfgang Krčmar (THN)

#### 3.3.1 Einleitung

Im Arbeitspaket 3 des Teilprojekts SP2 sollen mittels Finiter-Elemente-Methode geeignete Simulationsmodelle ausgearbeitet werden, um bei Aufheiz- und Abkühlprozessen für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Dampferzeuger thermische Spannungen zu berechnen, um auf diese Weise den Einfluss der Formsteingeometrie auf die in keramischen Speichermassen entstehenden thermischen Spannungen zu ermitteln. Auf dieser Datenbasis soll eine geometrische Optimierung der Formsteingeometrie keramischer Ziegel- und Cordierit-Wärmespeichermassen durchgeführt werden, mit dem Ziel, die thermischen Spannungen im Anwendungsfall zu minimieren. Ergänzend dazu, werden in experimentellen Arbeiten keramische Wärmespeichermassen durch Porosierung und den Einsatz von Wärmeleitadditiven hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften verbessert, wobei das vorrangige Ziel darin besteht, die Thermoschockbeständigkeit der Speichermassen zu erhöhen. Dazu werden spezielle keramische Massen im Labor zu Steingeometrien extrudiert, getrocknet und gebrannt und die so hergestellten Formsteine Thermoschock-Versuchen unterzogen. Darüber hinaus werden die Formsteine in einem speziellen Prüfofen zyklischen Heiß-Kalt-Thermoschock-Wechseln ausgesetzt, indem diese elektrisch aufgeheizt und mit Wasser abgeschreckt werden. Die so belasteten keramischen Speichersteine werden im Anschluss auf relevante werkstofftechnische und thermische Kenngrößen untersucht.

#### 3.3.2 Simulationsmodell Finite-Elemente-Methode - Verfahrensparameter

Im Rahmen von FE-Simulationen werden Cordierit-Hohlkörper durch Heißluft instationär erhitzt. Dabei soll mit einer einfachen Parametervariation, der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit ( $v_{inlet\_DS}$  [m/s]) und der Einlasstemperatur ( $T_{inlet\_DS}$  [K]) auf die entstehenden, zeitlich gemittelten maximalen und zeitlich absoluten maximalen Hauptspannungen untersucht werden. Die Strömungsgeschwindigkeit wird im Bereich von 5 bis 25 m/s variiert; die Einlasstemperatur im Bereich zwischen 600 °C bis 1000 °C bzw. 873,15 K bis 1273,15 K geregelt (Abbildung 41).

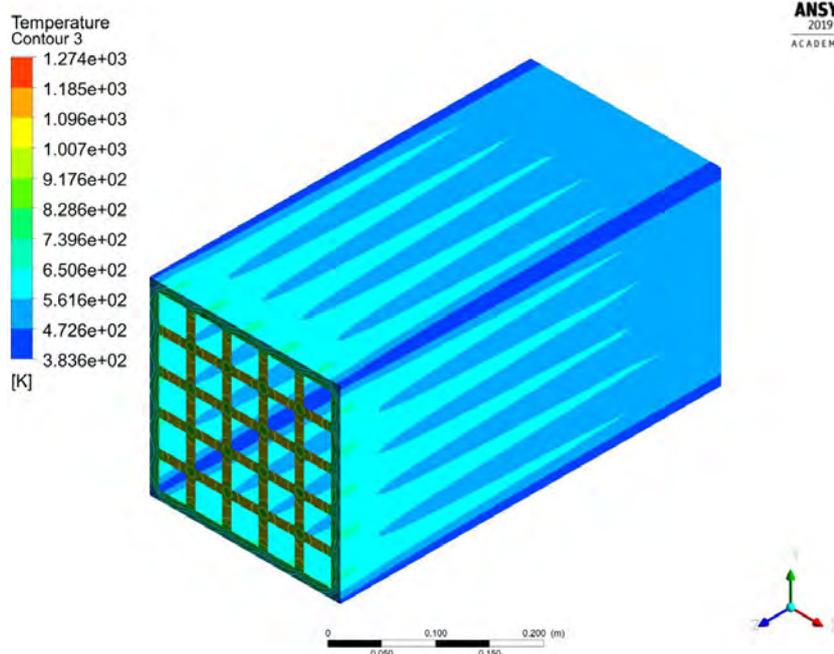


Abbildung 41: Instationärer Aufheizprozess eines keramischen Hohlkörpers durch Heißluft zur Berechnung der entstehenden thermischen Spannungen.

Zur Berechnung der Simulationen werden zuvor experimentell ermittelte Werkstoffeigenschaften für die Cordierit-Keramik und Datenbankwerte aus dem FEM-Programm ANSYS für Luft als Wärmeübertrager-Medium verwendet. Die Kenngrößen für die Cordierit-Keramik werden vereinfacht als nicht temperaturabhängig angenommen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Verwendete Materialdaten für die Simulation instationärer Aufheizversuche zur Untersuchung des Einflusses der Verfahrensparameter auf das Thermoschock-Verhalten von Cordierit-Keramik.

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	Thermische Leitfähigkeit λ <sub>10,tr</sub> [W/(mK)]
Cordierit	2130	1000	0,708
Luft	Ideales Gas	1012	0,026

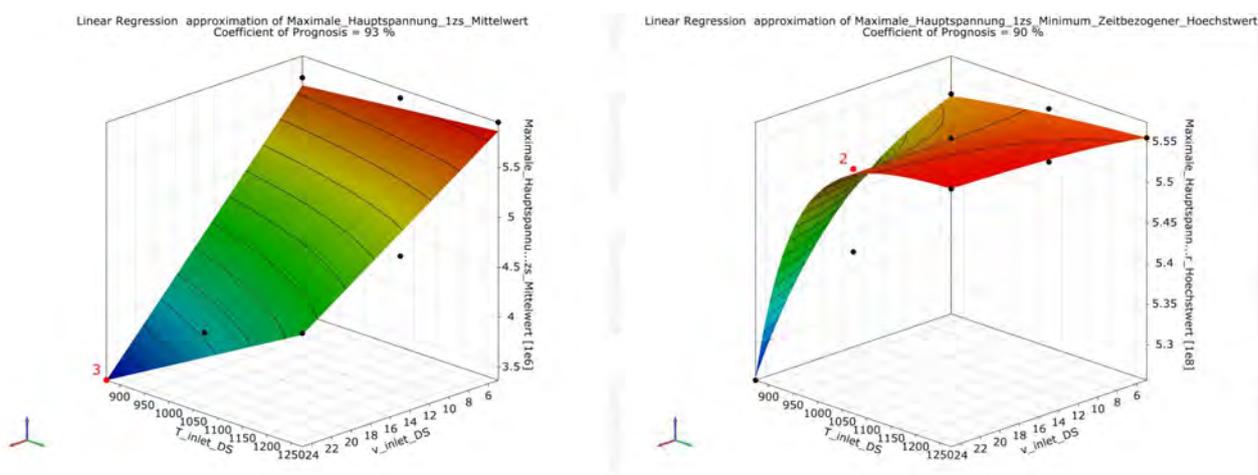


Abbildung 42: Darstellung zeitlich gemittelter maximaler thermischer Spannungen (links) und absoluter maximaler thermischer Spannungen (rechts), die bei instationären Aufheizprozessen durch Heißluft in einem keramischen Hohlkörper über einen Zeitraum von 240 s entstehen, in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit ( $v_{inlet\_DS}$  [m/s]) und der Einlasstemperatur ( $T_{inlet\_DS}$  [K]).

Berechnet werden die zeitlich gemittelten maximalen sowie die zu einem Zeitpunkt entstehenden maximalen thermischen Spannungen, die beim Aufheizen, mittels durch das Werkstück geführte Heißluft über einen Zeitraum von 240 s entstehen (Abbildung 42).

Insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit kann gemäß Simulation negative Auswirkungen auf die thermische Stabilität des keramischen Formsteins ausüben, da sowohl die zeitlich gemittelte, als auch die absolute maximale thermische Spannung deutlicher von der Strömungsgeschwindigkeit abhängen, als von der Einlasstemperatur der Heißluft. Der Aufheizzeitraum in der Simulation wurde so gewählt, dass der keramische Formstein bei allen Parameterkombinationen stets durchgeheizt wird, d.h. ein schonendes Aufheizen durch eine moderatere Strömungsgeschwindigkeit kann hier einen Vorteil für die Zyklenstabilität bieten.

### 3.3.3 Simulationsmodell Finite-Elemente-Methode - Porosität

In diesem Abschnitt werden instationäre Abschreck-Vorgänge an porösen Cordierit-Keramiken mit unterschiedlichen Porengeometrien, mittels Finiter-Elemente-Simulationen untersucht, mit dem Ziel, den Einfluss der Porenformen auf thermisch induzierte Spannungen zu ermitteln. In der Simulation wird die Keramik auf 720 °C erhitzt, bis bei dieser Endtemperatur ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Anschließend wird die Probe abrupt in ein definiertes Wasservolumen mit einer Temperatur von 20 °C eingebracht, um einen transienten Abschreckprozess zu generieren. Die daraus resultierenden Temperaturprofile und die resultierenden thermischen Spannungen im Werkstück, die sich aus dem Abschreckprozess ergeben, werden analysiert. Dies geschieht durch Simulation an Cordierit-Keramiken, die mit drei verschiedenen Porengeometrien, nämlich mit Kugel-, Zylinder- und Quaderform modelliert wurden. Dabei beträgt das Volumen der einzelnen Poren jeweils 10 mm<sup>3</sup>. Die quaderförmigen Poren verfügen über eine Länge von 3,128 mm, eine Breite von 2,065 mm und eine Höhe von 1,548 mm. Der Durchmesser der zylindrischen Poren beträgt 1,084 mm bei einer Höhe von 10,84 mm. Die kugelförmigen Poren haben einen Durchmesser von 2,673 mm (Abbildung 43). Der mittels CAD erstellte Cordierit-Probekörper wurde in Form eines Würfels mit einer Kantenlänge von 33,16 mm angenommen. Als virtuelles Fluid fungiert Wasser, das den Probekörper mit einem Volumen von 127,35 Litern umgibt. Die übrigen Materialdaten werden analog zu Kapitel 3.3.2 auf der Grundlage experimenteller Daten für Cordierit und der ANSYS-integrierten Datenbank für Luft und Wasser entnommen (Tabelle 8).

*Tabelle 8: Verwendete Materialdaten für die Simulation von Abschreck-Versuchen zur Untersuchung des Einflusses der Porengeometrie auf das Thermoschock-Verhalten poröser Cordierit-Keramik.*

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	Thermische Leitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ [W/(mK)]
Cordierit	2130	1000	0,708
Wasser	997	4184	0,600
Luft	Ideales Gas	1012	0,026

Die simulierten Proben werden mit isotrop und nicht-isotrop ausgerichteten Poren bezüglich der Richtungen der kartesischen Achsen erstellt, um auch einen möglichen Einfluss der Porenausrichtung auf das Thermoschock-Verhalten während des Abschreckprozesses zu untersuchen. Das Gesamtporen-Volumen von 20 % sowie das Volumen jeder einzelnen Pore wird für alle virtuellen Proben konstant gehalten, um allein den Einfluss der Porengeometrie zu bestimmen. Das Temperaturprofil der Proben wird als Funktion der Zeit berechnet. Die Temperaturverteilung wird innerhalb eines Zeitraums von jeweils 180 s in 1 s-Intervallen simuliert. Untersucht werden das Temperaturprofil der Proben in Abhängigkeit von der Zeit und die daraus resultierenden durchschnittlichen Zugspannungen, die während des Thermoschocks im Keramikkörper auftreten.

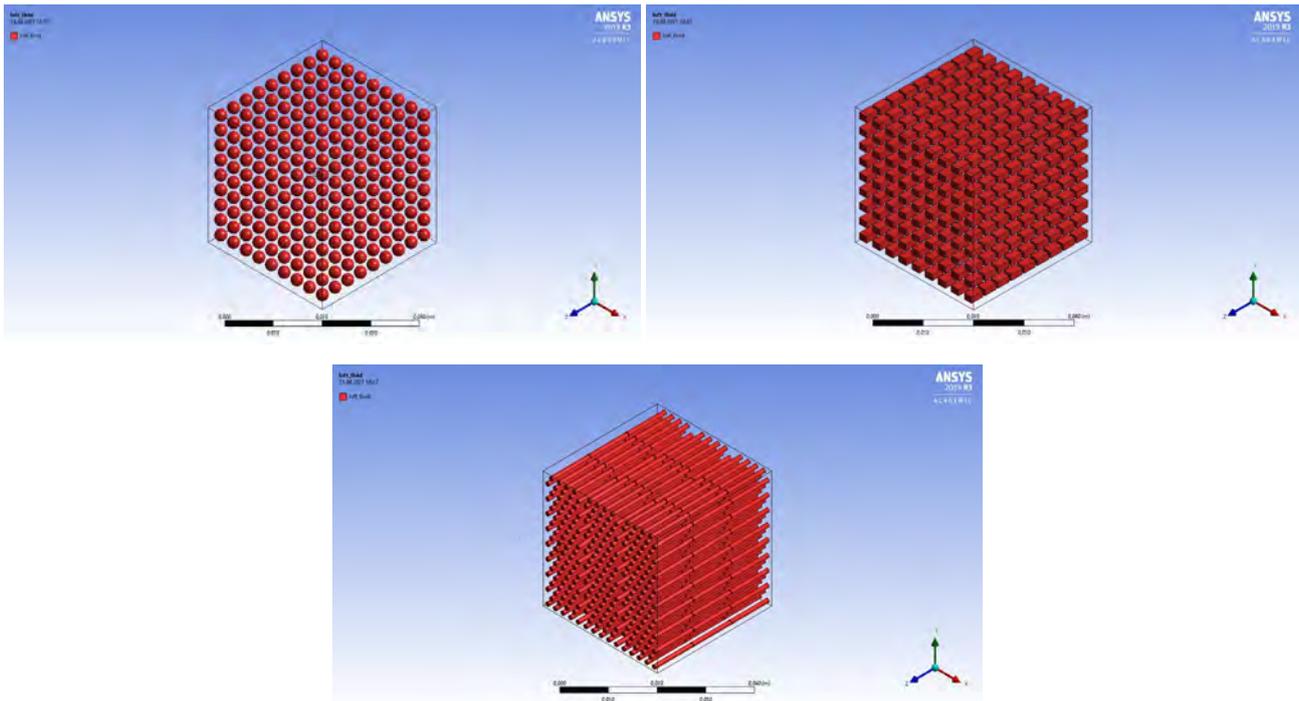


Abbildung 43: Sphärische (oben links), quaderförmige (oben rechts) und zylindrische (unten mittig) Poren, die entlang einer seitlichen Ausdehnung ausgerichtet sind.

Aus der Simulation geht hervor, dass die unporosierte Nullprobe die thermisch induzierten Spannungen am schnellsten auf- und abbaut (Abbildung 44). Die zylindrischen Poren haben den geringsten Einfluss auf die Reduzierung der thermisch induzierten Spannungen innerhalb der Probe. Der stärkste Einfluss tritt bei den Proben mit quaderförmigen Poren auf, während die kugelförmigen Poren ebenfalls eine deutliche Reduzierung der resultierenden Hauptspannung bewirken.

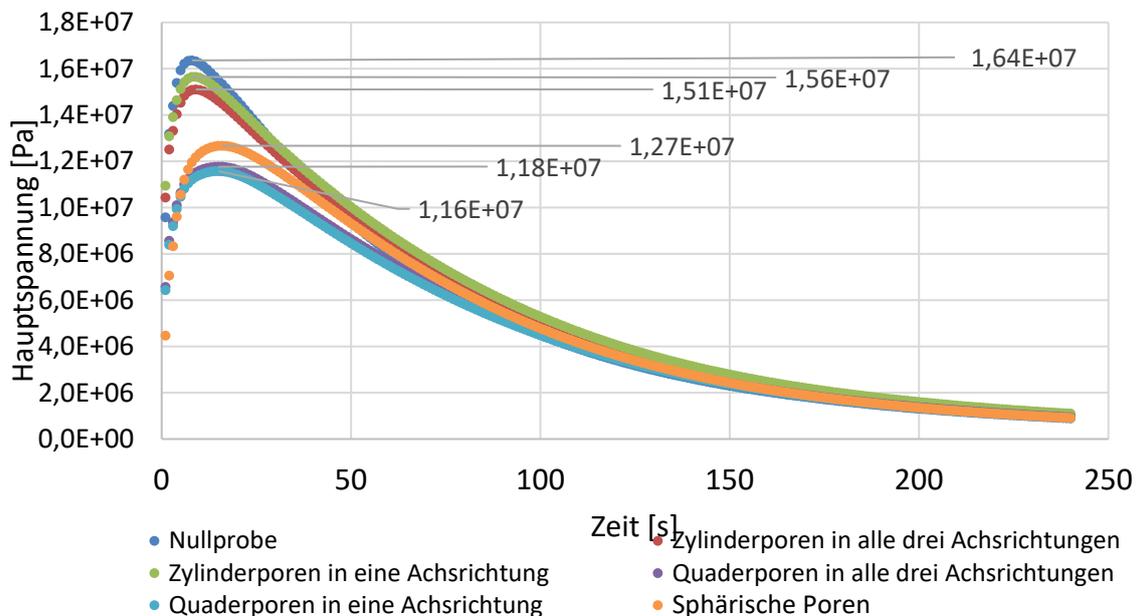


Abbildung 44: Durch Simulation berechnete, thermisch induzierte, durchschnittliche Hauptspannungen, die an der Cordierit-Keramik auftreten, die eine Temperatur von 720 °C aufweist, während diese abrupt in 20 °C temperiertem Wasser abgeschreckt wird, aufgetragen gegen die Zeit. Die maximal auftretende Spannung wird zwischen 8 und 16 Sekunden berechnet.

Hohe Spannungen in der Probe können Risse in den keramischen Körpern verursachen, die sich negativ auf die für technische Anwendungen wichtigen mechanischen Eigenschaften auswirken können. In den hier durchgeführten numerischen Berechnungen führen alle in die Keramik eingebrachten Poren zu einer Reduzierung der durch den Thermoschock verursachten mechanischen Hauptspannungen zwischen 4,87 % bis 29,27 % im Vergleich zur Nullprobe. Aus der Simulation geht hervor, dass jede der hier gewählten Porosierungsarten zu einer Erhöhung der Thermoschock-Beständigkeit der Keramik führen sollte. Unterschiede im Thermoschock-Verhalten gibt es hinsichtlich der verschiedenen Porengeometrien und ihrer jeweiligen Orientierung in den simulierten Cordierit-Probenn. Die Proben mit quaderförmigen Poren, die sowohl alle in eine Raumrichtung ausgerichtet, als auch in allen Raumrichtungen des Porenvolumens gleichmäßig verteilt sind, weisen die geringsten mechanischen Hauptspannungen beim Abschrecken auf (Reduktion der max. Hauptspannung um 29,27 % bzw. 28,09 %). Der Einfluss der Porenorientierung auf die resultierenden Hauptspannungen ist bei dieser Porengeometrie eher unbedeutend. Ebenso wird bei den simulierten Proben durch die Verwendung kugelförmiger Poren eine signifikante Reduktion der resultierenden Hauptspannungen im Vergleich zur porenfreien Probe um 22,55 % erreicht (Abbildung 45). Der Effekt der Reduktion der thermisch induzierten Spannungen ist bei den Proben mit zylindrischen Poren am geringsten, sowohl für die vollständig in einer Raumrichtung ausgerichteten Poren, als auch für die gleichmäßig in alle drei Raumrichtungen ausgerichteten Poren (Reduktion der maximalen Hauptspannung um 4,87 % bzw. 7,68 %). Aus den Ergebnissen der Simulation ist eine Verbesserung der Temperaturwechselbeständigkeit von Cordierit-Keramik durch Porosierung mit 20 Vol.-% grundsätzlich möglich. In zukünftigen Experimenten sollten die simulierten Versuche durch empirische Untersuchungen verifiziert werden. Darüber hinaus sollte der Einfluss der Porengeometrie durch eine Parameterstudie näher analysiert werden, in der die Wirkung von Variablen wie Aspektverhältnis, Einzelporenvolumen, volumenspezifische Oberfläche etc. untersucht werden.

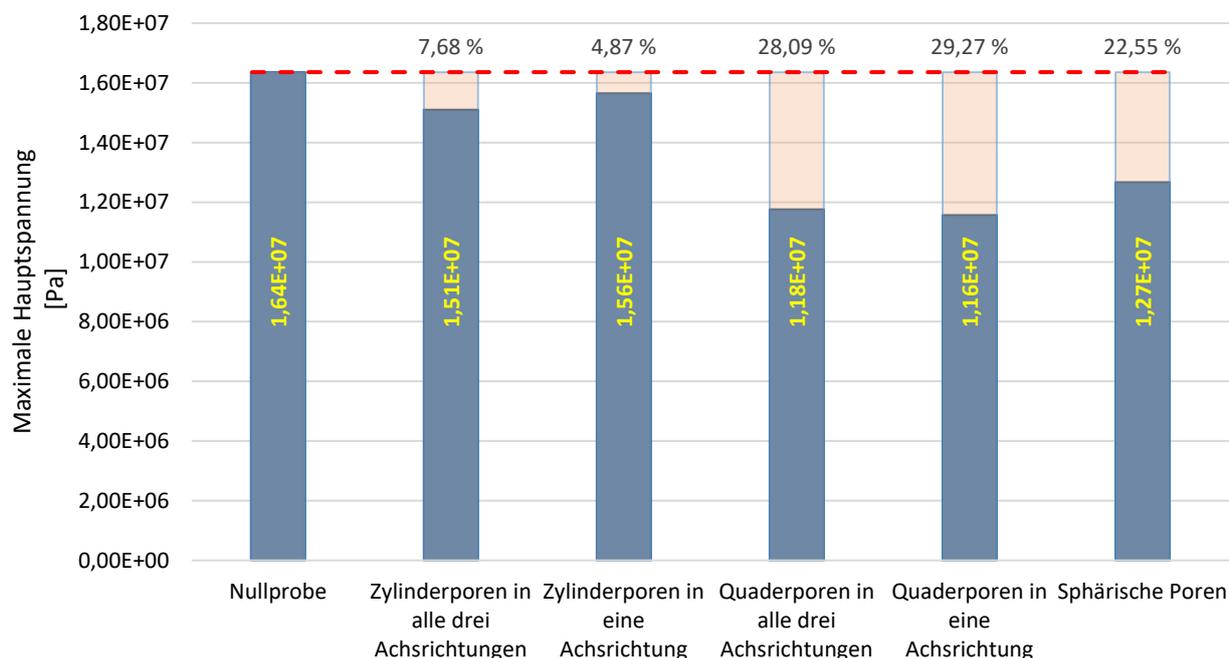


Abbildung 45: Aus der Simulation geht hervor, dass die unporosierte Cordierit-Nullprobe eine maximale Hauptspannung von 16,4 MPa aufweist. Wird die Cordierit-Keramik mit zylindrischen Poren ausgerüstet, so sinkt die maximale Hauptspannung auf 15,6 MPa, entsprechend um 4,87 %. Die niedrigste maximale Hauptspannung von 11,6 MPa ergibt sich bei in einer Raumrichtung ausgerichteten quaderförmigen Poren, was einer Minimierung der thermischen Spannungen um 29,27 % entspricht. Durch kugelförmige Poren in der Probe wird eine Reduzierung der thermischen Spannungen um 22,55 % bei einem simulierten Messwert von 12,7 MPa erreicht.

### 3.3.4 Simulationsmodell Finite-Elemente-Methode – Einfluss der Geometrie beim Abschrecken

Ebenfalls mittels der FE-Methode wird das schlagartige Abschrecken keramischer Hohlkörper mit einer Temperatur von 520 °C in einem Wasserbad der Temperatur 20 °C simuliert. Dabei treten insbesondere in den ersten 25 Sekunden die maßgebenden Spitzen der auf diese Weise thermisch induzierten Spannungen auf. Als virtuelle Probekörper werden extrudierte Rahmenflächen regelmäßiger Polygone aufsteigend vom Viereck bis zum Zehneck und die extrudierte Rahmenfläche eines Kreises in den Simulationen berechnet (Abbildung 46).

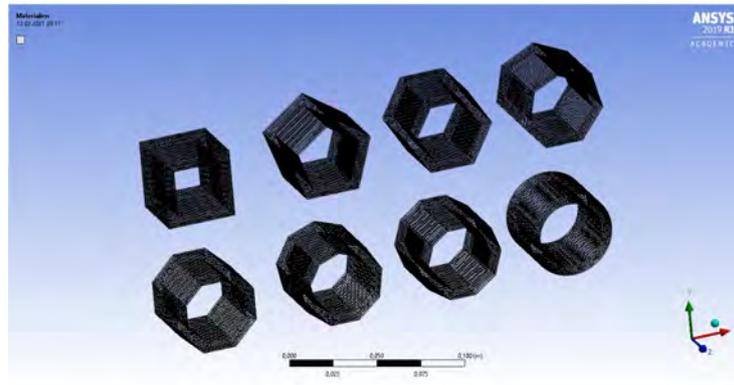


Abbildung 46: Vernetzungsmodell der Probekörper

Die Probekörper sind in der Art konstruiert, dass diese innerhalb einer Vergleichsgruppe, die von 1/5 bis 4 nummeriert ist, stets gleich große Volumina, Stegbreiten und Extrusionslängen aufweisen, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Bei Parametervariation I wird bei jedem Probekörper bei konstant gehaltener Stegbreite  $b$  und Extrusionslänge  $h$  das Volumen  $V$  durch Veränderung der Kantenlänge  $A$  variiert und danach bei konstanter Stegbreite  $b$  und konstanter Kantenlänge  $A$  die Extrusionslänge  $h$  verringert (Abbildung 47).

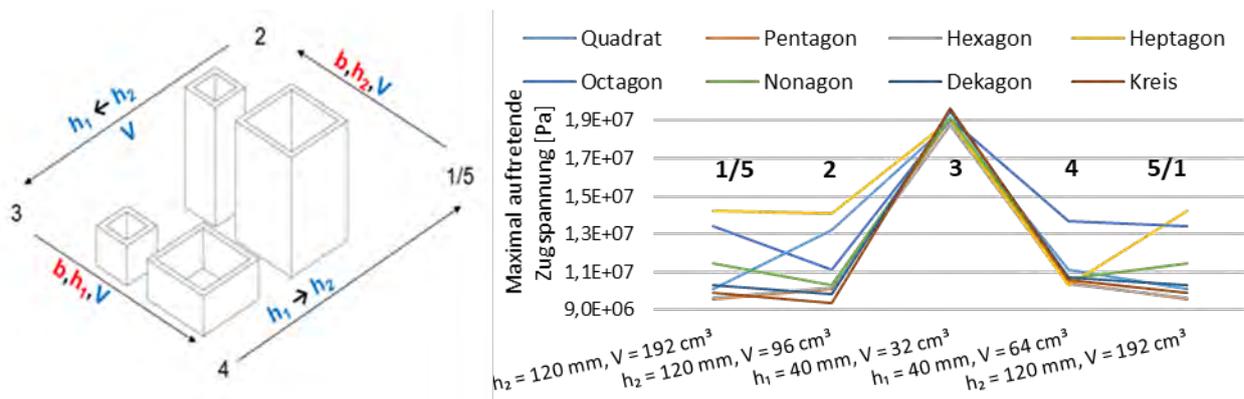


Abbildung 47: Geometrische Parameter-Variation I über Veränderung der Kantenlänge  $A$  und Veränderung der Extrusionslänge  $h$ .

Die Variation der Kantenlänge  $A$  in Schritt 3  $\rightarrow$  4 zeigt bei Parameter-Variation I einen deutlichen Einfluss, wohingegen eine Änderung der Kantenlänge bei Schritt 1  $\rightarrow$  2 nur wenig Auswirkung auf die resultierenden Zugspannungen des Formsteins ausübt. Die Extrusionslänge  $h$  hat bei Schritt 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  $A$  sehr deutlich und entsprechend umgekehrt bei großer Extrusionslänge  $h$  schwach ausgeprägt.

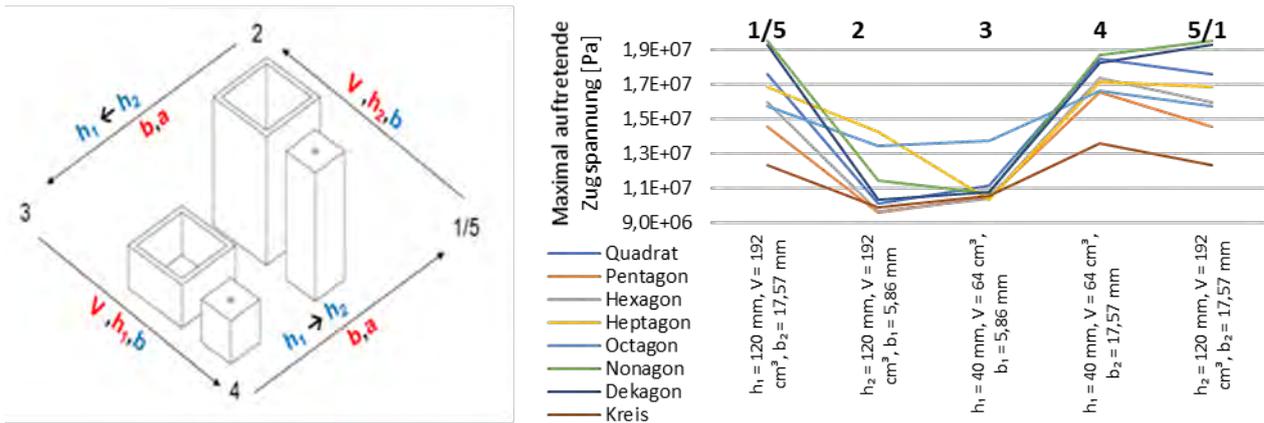


Abbildung 48: Geometrische Parameter-Variation II über Veränderungen der Stegbreite  $b$  und der Extrusionslänge  $h$ .

Bei Parameter-Variation II wird bei konstant gehaltenem Volumen  $V$  und konstanter Extrusionslänge  $h$ , nur die Stegbreite  $b$  variiert. Danach wird, wie bei der ersten Variation bei konstantem Volumen  $V$  und Stegbreite  $b$  die Extrusionslänge  $h$  variiert (Abbildung 48). Dabei erfolgt durch eine Abnahme der Stegbreite immer eine eindeutige Minderung der resultierenden Zugspannungen. Ebenso wie bei der Parameter-Variation I zeigt auch in diesem Fall bei einer kleineren Kantenlänge  $A$  die resultierende Zugspannung eine starke Abhängigkeit von der Extrusionslänge  $h$  und umgekehrt. Folglich sind bei der Kombination einer hohen Extrusionslänge  $h$  und einer niedrigen Kantenlänge  $A$  und bei der Kombination einer niedrigen Extrusionslänge  $h$  und einer hohen Kantenlänge  $A$  die entstehenden thermischen Zugspannungen besonders niedrig.

### 3.3.5 Simultane thermische Analyse von Ziegel- und Cordierit-Keramik

Für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten von Ziegel- und Cordierit-Keramik-Proben wurden die pulverförmigen Proben zunächst bei einer Temperatur von  $105\text{ °C}$  rückgetrocknet und anschließend mittels „Simultaner Thermischer Analyse“ (STA) zyklischen Temperaturprofilen zwischen  $200\text{ °C}/300\text{ °C}$ ,  $300\text{ °C}/400\text{ °C}$ ,  $400\text{ °C}/500\text{ °C}$ ,  $500\text{ °C}/600\text{ °C}$ ,  $600\text{ °C}/700\text{ °C}$  und  $700\text{ °C}/800\text{ °C}$  jeweils in einer Atmosphäre aus synthetischer Luft (80 Vol.-%  $\text{N}_2$ , 20 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) unterworfen (Abbildung 49).

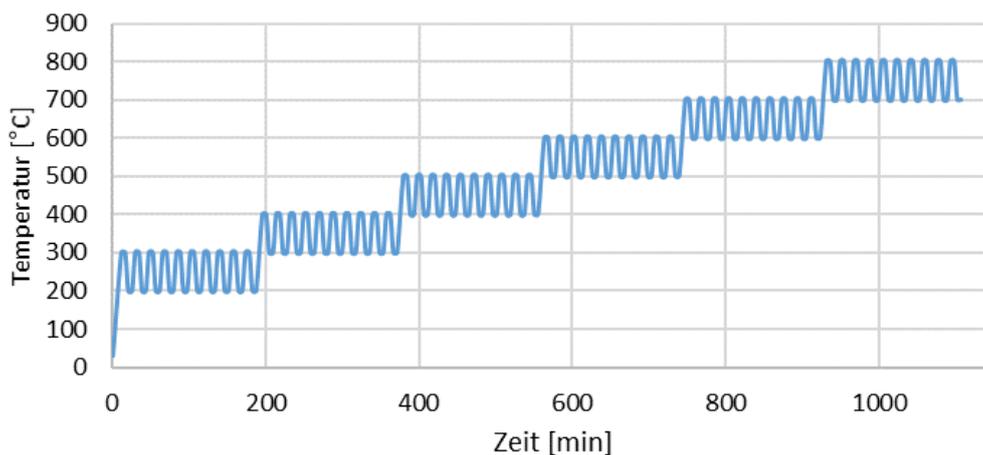


Abbildung 49: Zyklische Temperaturbeanspruchungen im Verlauf von STA-Messungen an Cordierit- und Ziegelpulver.

Das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Wärmeenergie wird als Effizienz  $\eta$  bezeichnet. Die ein- und ausspeicherbaren Wärmeenergien beider Keramik-Sorten nähern sich mit steigender Einsatztemperatur einem Sättigungswert an. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten kann mit dem Dulong-Petit-Gesetz erklärt werden, nach dem Feststoffe bei steigender Temperatur einer molaren Wärmekapazität von  $3R$ , d.h. einem konstanten Wert abhängig von ihrer molekularen Zusammensetzung, zustreben (Abbildung 50).

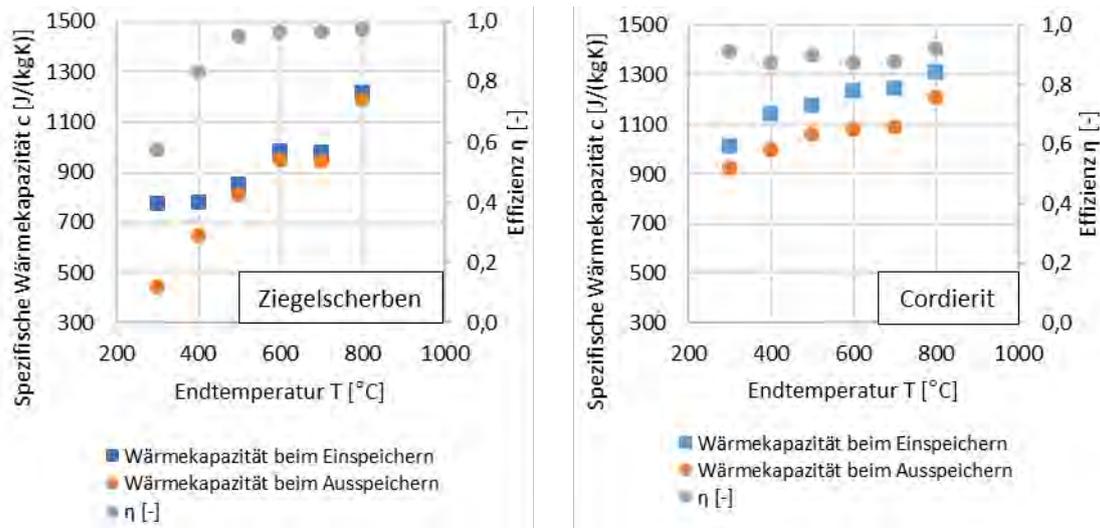


Abbildung 50: Spezifische Wärmekapazität  $c$  und Effizienz  $\eta$  von Ziegel-Keramik (links) und Cordierit-Keramik (rechts) in Abhängigkeit von der Endtemperatur.

Grundsätzlich ist eine hohe Wärmekapazität  $c$  für die Anwendung des Werkstoffs als Wärmespeichermaterial erwünscht, um eine große Energiedichte bezogen auf das Gewicht zu erreichen, während zugleich die Effizienz  $\eta$  ebenfalls möglichst hoch sein sollte, damit ein effektiver Speicherprozess mit geringen Energieverlusten realisiert werden kann. Diese Anforderungen werden tendenziell bei höheren Einsatztemperaturen besser erfüllt.

### 3.3.6 Prüfstand für thermische Speichermassen

In einem eigens entwickelten Prüfofen (Abbildung 51) werden in einem Druckbehälter (2 bar) verschiedene Speichermassen aus Ziegel- und Cordierit-Keramik eingesetzt und zyklischen Abschreckversuchen unterworfen. Das Ziel besteht darin, deren Eignung für die thermische Energiespeicherung zu untersuchen. Als Probekörper werden kommerziell erhältliche Planziegel mit den Abmessungen (L x B x H) 248 x 370 x 249 mm verwendet, die mittels elektrischer Strahlungsheizung im Prüfofen auf eine erwünschte Temperatur erhitzt und nach einer definierten Haltezeit von einer regelbaren Düse mit fein zerstäubtem VE-Wasser besprüht werden. Bei dieser schlagartigen Abschreckung der Ziegel erfolgt eine Direktdampferzeugung. Der so entstandene Wasserdampf wird bei einem Auslassdruck von 2 bar über ein Dampfventil freigesetzt und in einem Wasserbecken auskondensiert. Bei den Versuchen werden massive Hochlochziegel auf die Temperaturen 450  $^{\circ}\text{C}$ , 500  $^{\circ}\text{C}$  und 550  $^{\circ}\text{C}$  erhitzt und jeweils mit einem VE-Wasser-Volumenstrom von 25 l/h auf eine um 200 K niedrigere Temperatur abgeschreckt. Dabei wurden die Aufheiz- und Abschreck-Versuche mit einer Zyklenfolge von 3 durchgeführt. Abbildung 52 zeigt die gemittelten Ergebnisse der jeweils ausgespeicherten und eingespeicherten Energien sowie die daraus berechneten Effizienzen in Relation zu der jeweils vorherrschenden Endtemperatur.



Abbildung 51: Prüfofen bis 2 bar Innendruck für die Durchführung zyklischer Aufheiz- und Abschreckversuche an handelsüblichen Mauerziegeln als Speichermasse.

Aus den durchgeführten Versuchen geht hervor, dass sich die Wärmespeicherkapazität mit steigenden Temperaturen, ebenso wie das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Energie analog zu den Versuchen in Kapitel 3.3.5 mit steigender Temperatur erhöht.

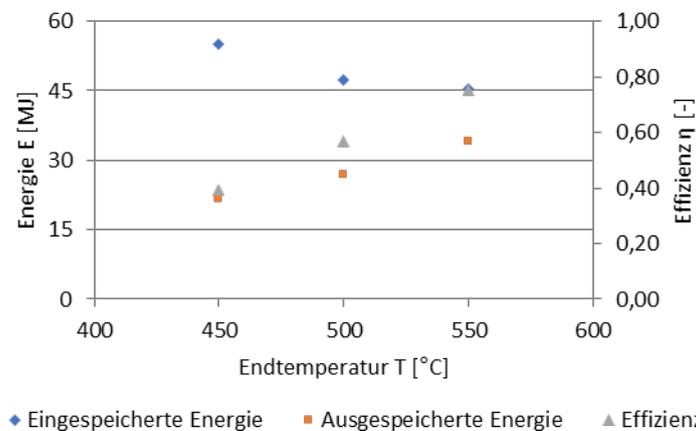


Abbildung 52: Prüfofen bis 2 bar Innendruck für die Durchführung zyklischer Aufheiz- und Abschreckversuche an handelsüblichen Mauerziegeln als Speichermasse. Abbildung 12: Mittelwerte der aus- und eingespeicherten Wärmeenergien und die daraus berechneten Effizienz-Werte in Abhängigkeit von der Endtemperatur.

### 3.3.7 Zukünftige Tätigkeiten im Teilprojekt

Die in Kapitel 3.3.3 simulierten porosierten Keramik-Proben wurden inzwischen mit jeder der genannten Porengeometrien und Volumenanteilen von 5, 10, 15 und 20 % im Labor hergestellt und derzeit Thermoschock-Versuchen unterzogen, um deren Auswirkungen auf die werkstofftechnischen Kenngrößen zu untersuchen. Die besten Proben werden anschließend im Prüfofen hinsichtlich ihrer Zyklenstabilität getestet. Im Prüfofen wurden Abschreckversuche mit 200 Zyklen an Cordierit-Proben durchgeführt. Das zyklische Abschrecken ist bereits beendet und die Proben werden gegenwärtig auf werkstofftechnische Kenngrößen untersucht, um Veränderungen in Abhängigkeit von der Zyklenzahl zu erfassen. Dazu wurden die Proben im Prüfofen von 600 °C auf 400 °C abgeschreckt und je 5 Proben bei 10, 20, 30, 40, 50, 100 und 200 Zyklen entnommen.

#### Abschätzung der thermischen Speichermasse für eine Speicherkapazität von 10 MWh

Mittels einer ersten groben Abschätzung wird überschlägig die Größenordnung der benötigten Speichermassen am Beispiel eines kommerziell erhältlichen Lochziegels bestimmt. Der betrachtete Steintyp weist einen Lochanteil von 50 Vol.-% und eine Wärmespeicherkapazität von ca. 1 J/(g K) bzw. 0,8 J/(cm<sup>3</sup> K) auf. Mit der Abschätzung werden die Masse und das Volumen in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz der mindestens benötigten Steine ermittelt, um einen thermischen Speicher mit 10 MWh Speicherkapazität zu realisieren (Abbildung 53). Eine größere Temperaturdifferenz ist durch höhere Einsatztemperaturen umsetzbar. Bei hohen Einsatztemperaturen steigt die Effizienz der Wärmespeicherkapazität und die einzusetzende Masse bzw. das Volumen der Speichermassen sinkt. Da allerdings mit höherer Betriebstemperatur der Anspruch an das Container- und das Wärmeisolationsmaterial steigt, muss hier ein technischer und wirtschaftlicher Kompromiss für das Gesamtsystem geschlossen werden. Der Bereich von  $\Delta T = 400 - 600$  K (entspricht im Anwendungsfall einem Bereich der maximalen Betriebstemperatur von mindestens 520 – 720 °C) ist technisch und wirtschaftlich realisierbar. Bei diesen Betriebstemperaturen sind die mindestens benötigte Masse der Ziegelkeramik mit 90 – 60 t bzw. das mindestens benötigte Volumen von 113 – 75 m<sup>3</sup> im unteren Bereich angesiedelt.

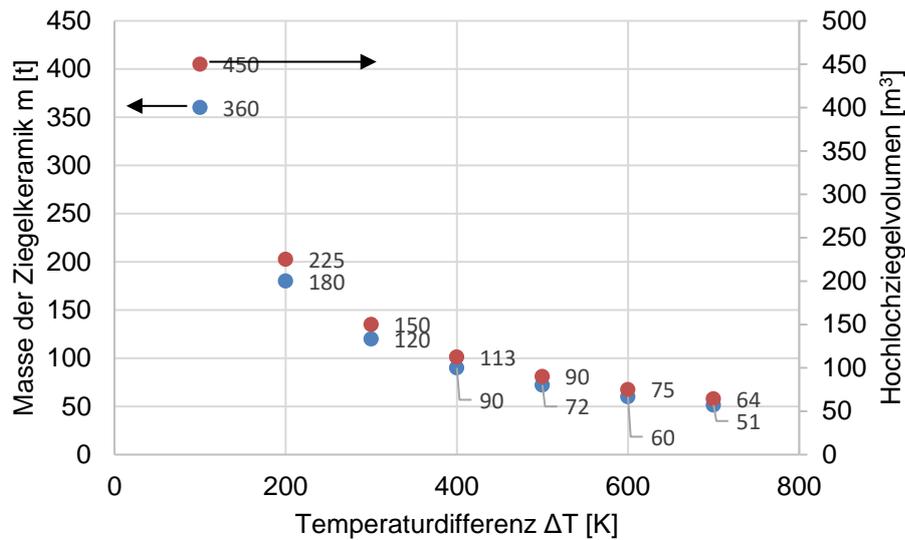


Abbildung 53: Erste Abschätzung der benötigten Masse und des Volumens zur Realisierung eines 10 MWh Wärmespeichers mit kommerziell erhältlichen Hochlochziegeln mit einem Lochanteil von 50 Vol.-%.

Mit einer umfangreichen Parameterstudie, werden aktuell sowohl geometrische Parameter (z.B. Kantenlänge der Stirnfläche des Grundkörpers, Stegbreite, Extrusionslänge, etc.) als auch materialeitige Parameter (z.B. Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, etc.) und verfahrensseitige Parameter (Strömungsgeschwindigkeit und Einlasstemperatur der durchströmenden Luft) als Input-Parameter innerhalb eines realisierbaren Wertebereichs beim instationären Aufheizen variiert (Tabelle 9). Mittels einer Sensitivitätsstudie mit dem Programm „optiSLang“ werden die von den Input-Parametern beeinflussten werkstofftechnischen, verfahrens- und simulationsseitigen Output-Parameter sowie die quantitative Größenordnung des Einflusses der Input-Parameter auf die Output-Parameter ermittelt und zu einer umfassenden geometrischen, material- und verfahrensseitigen Optimierung des Wärmespeicherprozesses genutzt.

Tabelle 9: Ausgewählte geometrische, materialseitige und verfahrensseitige Input-Parameter und deren verwendeter Wertebereich sowie die beeinflussten werkstofftechnischen, verfahrens- und simulationsseitigen Output-Parameter zur Anwendungsoptimierung.

Input-Parameter				
Geometrische Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
A_DS	50	350	mm	Kantenlänge Grundkörper
m_DS	2	5	oE	m=n+1 mit n=Anzahl Löcher in x und y Richtung
sb_DS	10	50	mm	Stegbreite
z_DS	200	800	mm	Extrusionslänge
a_DS	26,67	108,33	mm	Kantenlänge Einzelement, $a = f(A, m, sb)$
x_DS	200,18	800,10	mm	Lochbreite, $x = f(A, m, sb)$
v_DS	26,72	108,40	mm	Versatz für Muster, $v = f(A, m)$
roughness_DS	-1	1	mm	Oberflächenrauheit
Materialseitige Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
roh_DS	1800	2400	kg/m <sup>3</sup>	Dichte Keramik
cp_DS	600	1500	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität Keramik
lambda_DS	0,5	2	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit Keramik
epsilon_ws_DS	0,4	0,99	oE	Emissionskoeffizient Keramik
Verfahrensseitige Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
v_inlet_DS	5	25	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
T_inlet_DS	773,15	1273,15	K	Einlasstemperatur
Output-Parameter				
Werkstofftechnische Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
Hauptspannung Maximum	-		Pa	1. Hauptspannung
Hauptspannung Minimum	-		Pa	3. Hauptspannung
Verfahrensseitige Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
delta_p	-		Pa	Druckverlust
Simulationsseitige Parameter				
Parameter	Wertebereich		Einheit	Beschreibung
y <sup>+</sup>	-		oE	Dimensionsloser Wandabstand

Mit den so gewonnenen Daten, soll durch einen modularen Aufbau der simulierten Grundkörper, ein verbessertes Konzept für einen Direktdampferzeuger mit einer Speicherkapazität von ca. 10 MWh entwickelt werden, der in einem Dampfkraftwerk wechselweise zum Vorwärmen des Speisewassers oder zum Einleiten von Sattdampf in eine Fernwärmeleitung dienen soll.

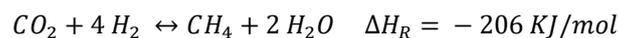
## 4 Dynamisches Verhalten von Power-to-Gas und Power-to-Liquid Synthesen (SP3)

### 4.1 Reaktorkonzept für dynamische Methanisierung

*Simon Markthaler, Michael Neubert, Jürgen Karl (EVT)*

Methan ist einer der wichtigsten Primärenergieträger in der europäischen Energiewirtschaft. Vor allem im Wärmesektor spielt Methan eine tragende Rolle. Zum einen findet die Prozesswärmeeinbindung in industriellen Anlagen häufig mit Hilfe von Methan statt [13]. Zum anderen wird ein Großteil der Heizungssysteme in deutschen Haushalten mit Methan versorgt [14]. Der anhaltende Ausbau von Gasheizungen im deutschen Wärmemarkt [15] – mit Laufzeiten von bis zu 25 Jahren – ist nur ein Indiz dafür, dass Methan im europäischen Energiesystem auch in den nächsten Jahrzehnten von großer Bedeutung sein wird.

Bei der extensiven Nutzung von Methan gibt es jedoch ein Problem: der Großteil des heute genutzten Methans stammt aus fossilen Quellen (Erdgas) und trägt somit bedeutend zum Klimawandel bei. Um das zu ändern und das fossile Erdgas durch erneuerbar produziertes Methan zu substituieren, ist es notwendig, eine nachhaltige Syntheseroute für Methan zu etablieren. Eine Möglichkeit ist die chemische Speicherung von erneuerbaren Energien über die Elektrolyse in Wasserstoff und die weitergehende katalytische Methanisierung mit Kohlenstoffdioxid über die exotherme Sabatier-Reaktion:



Als Kohlenstoffquellen bieten sich hier vor allem industrielle Prozessgase (z.B. Stahlwerksgase) oder biogene Gase an, letztere entstehen bei der anaeroben Fermentation von Biomasse (z.B. in Biogasanlagen oder Klärwerken). Die Kernherausforderungen bei dieser nachhaltigen, katalytischen Synthese von Methan sind dabei folgende:

- Die fluktuierende Einspeisung von erneuerbaren Energien bedingt eine schwankende Wasserstoffproduktion, die eine **dynamische Fahrweise über einen breiten Teillastbetrieb** erfordert.
- Die Anbindung an die dezentral anfallenden Kohlenstoffquellen verschiedener Größenordnungen verlangt ein kostengünstiges und **skalierbares Reaktorkonzept mit geringer Komplexität**.
- Für den stabilen Langzeitbetrieb ist ein **effektives Temperaturmanagement** erforderlich, bei der das Sintern der Katalysatoren und damit deren Deaktivierung vermieden wird.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde ein zweistufiges Reaktorsystem mit Zwischenkondensation entwickelt und anhand eines Prototyps mit einer maximalen Syntheseleistung von  $P_{syn} = 5 \text{ kW}$  experimentell untersucht (siehe Abbildung 54). Der Prototyp ist als Reaktorblock ausgeführt, in dem 9 Reaktionskanäle mit einem Festbett aus Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Katalysatorpellets (Hersteller: Clariant AG) enthalten sind. Um die Reaktionswärme effektiv abzuführen und ein adäquates Temperaturmanagement zu gewährleisten, wird der Reaktorblock mittels Heatpipes (dt. Wärmerohre) gekühlt. Die zweite Stufe, in der weniger Umsatz erreicht wird und die Wärmefreisetzung somit geringer ausfällt, ist als einfacher Festbettreaktor ausgeführt. Bei einer umfangreichen Versuchsreihe konnte die herausragende Teillastfähigkeit des Systems bestätigt werden, unabhängig von Syntheseleistung bzw. Eduktgasvolumenstrom wird hierbei eine hohe Produktgasqualität (Brennwert:  $H_U \approx 34,9 \text{ MJ/Nm}^3$ ; Oberer Wobbe-Index:  $W_{u,n} \approx 14,6 \text{ kWh/m}^3$ ) durch das System erbracht. Die zweite Methanisierungsstufe dient hierbei als Puffer und kompensiert geringere Umsätze im heatpipe-gekühlten Reaktor. Somit sorgt das zweistufige System für eine nahezu gleichbleibende Methankonzentration des Produktgases ( $y_{\text{CH}_4} \approx 96 \%$ ). Die Heatpipe-Kühlung verhindert darüber hinaus die Überschreitung der Sintertemperaturen in der ersten Stufe.

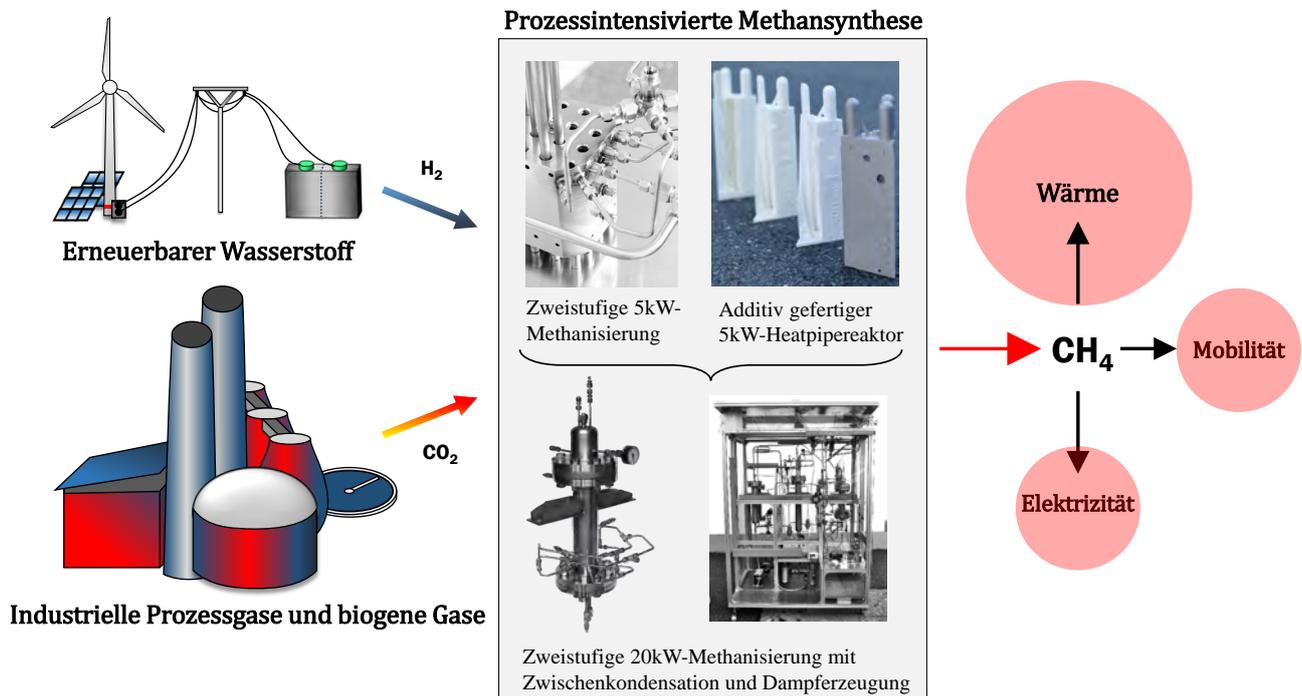


Abbildung 54: Entwicklung eines Reaktorkonzepts zur zweistufigen Methanisierung von Kohlenstoffdioxid mit grünem Wasserstoff für die sektorenübergreifende Methanbereitstellung

Neben der experimentellen Analyse der Teillastfähigkeit, wurde zudem das An- und Abfahrverhalten im intermittierenden Betrieb und das dynamische Verhalten bei Laständerungen untersucht. Für einen Kaltstart des Systems waren hierbei ca. 2 Stunden notwendig, dies lag vor allem am Reaktorblock der ersten Stufe. Der Reaktorblock wurde aus massivem Edelstahl gefertigt (25 kg, 5 kg/kW). Die relativ große Masse musste beim Anfahren aufgeheizt werden, jedoch bietet Sie im laufenden Betrieb einen lokalen Wärmespeicher. Bei einer kurzzeitigen Unterbrechung der Gasversorgung (bis ca. 1 Std) sorgt der Wärmespeicher dafür, dass die für die Reaktion benötigten Temperaturen von mindestens 250 °C über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden. Für den anschließenden Heißstart werden somit nur rund 30 Minuten benötigt, um den Leistungssprung von  $P_{syn} = 0 \text{ kW}$  auf 4,5 kW zu bewältigen und die Festbetttemperaturen von  $T \approx 350 \text{ °C}$  auf die stationären Bedingungen mit  $T \approx 500 \text{ °C}$  anzuheben. Werden im laufenden Betrieb Laständerungen durchgeführt, reagiert das System mit einer unmittelbaren Anpassung der Produktgaskonzentrationen („fast concentration response“), während sich die Festbetttemperaturen erst allmählich anpassen („slow temperature response“) (siehe Abbildung 55). Die Ergebnisse aus den dynamischen Versuchen zeigen allgemein, dass das zweistufige System im laufenden Betrieb auch Laständerungen von bis zu 10 % der Volllast pro Minute problemlos durchführen kann, ohne dass eine Deaktivierung festgestellt werden konnte.

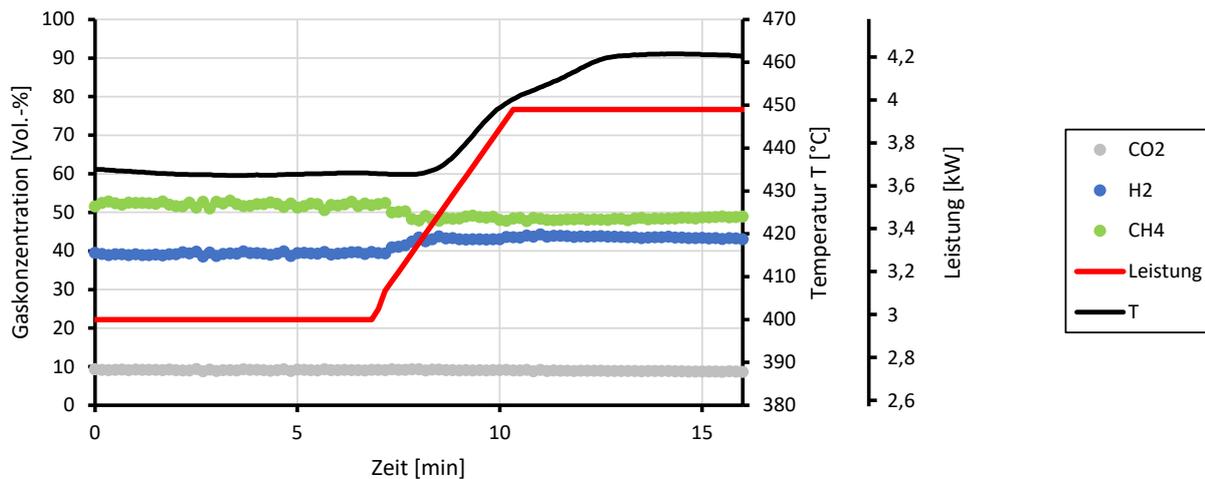


Abbildung 55: Produktgaskonzentration von Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid und Methan nach der ersten Stufe und Temperaturen in der Mitte des Reaktionskanals bei einer Änderung der Syntheseleistung

Die Analyse des axialen und radialen Temperaturprofils in den Reaktionskanälen der ersten Stufe offenbart zudem zwei unterschiedliche Zonen eines polytropen Rohrkanalreaktors: Eine *Hauptreaktionszone* mit hohen Temperaturen am Eintritt des Reaktionskanals (gleichgewichtslimitiert; bis 550 °C) und eine darauffolgende *Nachreaktionszone* mit gemäßigten Temperaturen (kinetisch limitiert; < 400 °C). Um auch in der Nachreaktionszone das Reaktionsgleichgewicht und damit einen höheren Umsatz zu erreichen, müssen die Temperatur und/oder die Verweilzeit der Gase erhöht werden. Über einen 5kW-Reaktor mit Heatpipe-Kühlung und konischem Reaktionskanal (AddMeth1) können gleich beide Parameter positiv beeinflusst werden. Die Umsetzung von AddMeth1, welcher sich im Gegensatz zum Vorgängermodell durch eine äußerst komplexe Reaktorgeometrie auszeichnet, wurde mit Hilfe der additiven Fertigung durchgeführt. Dieses innovative Reaktorkonzept wurde gleich in zwei Projekten (EU-Projekt: i<sup>3</sup>upgrade, RFCS Contract Nr.: 800659; BMEL-Projekt: FlexBiomethane, Förderkennzeichen: 22035318) aufgegriffen, in denen eine experimentelle Charakterisierung und Evaluation des Systems geplant ist. Die Anwendungsdemonstration bedarf allerdings noch einem tiefergehenden Forschungsbedarf, der vor allem Aspekte zur Materialfestigkeit miteinschließt.

Um trotzdem die Skalierbarkeit des zweistufigen Reaktorsystems zeitnah zu überprüfen und eine zügige Demonstration einer leistungsstarken Anlage zu ermöglichen, wurde zudem ein neuartiges heatpipe-gekühltes 20kW-Reaktormodell entwickelt, welches über Normteile und konventionelle Fertigungs- und Schweißverfahren gefertigt werden kann. Bei diesem Modell tauchen die Heatpipes direkt in die Festbetschüttung ein, was eine besonders effiziente Wärmeabfuhr ermöglicht. Die Inbetriebnahme des 20kW-Gesamtsystems aus Heatpipe-Reaktor, Zwischenkondensation, Festbettreaktor und Nachkondensation ist für Ende 2021 geplant. Im Rahmen des BMWi-Projekts Power-to-Biogas (Förderkennzeichen: 03KB165A) wurde das System um einen Dampferzeuger erweitert, mit dem Satttdampf (10 bar, 180 °C) für die Wärmeeinbindung in Biogas- und Kläranlagen produziert werden kann. Für die anwendungsnahe Erprobung des 20kW-Methanisierungssystems ist im BMWi-Projekt Power-to-Biogas ein Feldtest an einer Biomethananlage und im BMWi-Projekt Kläffizient (Förderkennzeichen: 03EI5421A) ein Feldtest an einem Klärwerk geplant. Anhand dieser Demonstrationsvorhaben soll die Leistungsfähigkeit in industrieller Umgebung überprüft und der hohe Reifegrad der Technologie bestätigt werden.

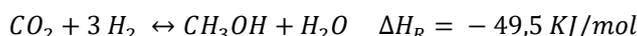
Zusammenfassend wurde in diesem Projekt ein Reaktorkonzept zur katalytischen Methanisierung entwickelt, welches auf einen dynamischen Betrieb mit guter Teillastfähigkeit ausgelegt ist. Es besteht aus zwei Reaktorstufen mit einer Zwischenkondensation von Wasserdampf, wobei sich das System aus einem polytropen Reaktor mit Heatpipe-Kühlung (1. Stufe) und einem einfachen Festbettreaktor (2. Stufe) zusammensetzt. Neben einer anwendungsnahe Demonstration im Rahmen von zukünftigen Feldtestversuchen werden die Erkenntnisse zu den Reaktionszonen und zum axialen Temperaturverlauf für eine weitere Optimierung der Reaktorgeometrie dienen. Das Ziel ist es hierbei, die Methanisierung

auch in großen Skalen effizient, langzeitstabile und wirtschaftlich umzusetzen und somit eine nachhaltige Produktion des systemrelevanten Energieträgers Methan zu ermöglichen.

## 4.2 Katalysatorentwicklung für die instationäre Methanolsynthese

*Patrick Schühle, Peter Wasserscheid, Jakob Albert (CRT)*

Die Erzeugung erneuerbarer Energie durch Photovoltaik oder Windkraft findet oftmals 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  $\text{CO}_2$  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.

In der heutigen industriellen Methanolsynthese kommen überwiegend heterogene  $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ -Katalysatoren zum Einsatz [1]. Bei der Verwendung für das beschriebene ressourcenschonende Verfahren unterliegt diese Klasse von Katalysatoren allerdings Deaktivierungsprozessen [2][4]. Ein alternatives und bisher wenig erforschtes, aber vielversprechendes Katalysatorsystem stellen geträgerte  $\text{In}_2\text{O}_3$ -Materialien dar [5][6]. Im Rahmen dieses Projekts wurden vielfältige Aspekte zum Einsatz  $\text{In}_2\text{O}_3$ -basierter Katalysatoren für die grüne Methanolsynthese untersucht. Zu diesem Zweck wurden zwei reaktionstechnische Anlagen in Betrieb genommen. In einem klassischen Festbettreaktor konnten Studien zum Einfluss von Prozessgasverunreinigungen auf die katalytische Performance von  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysatoren erfolgreich durchgeführt werden. Eine schematische Zusammenfassung dieser Arbeiten gibt Abbildung 56 wieder. Im Detail wurden die Katalysatoren mit potentiellen Verunreinigungen von  $\text{CO}_2$ -Quellen ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$  und kurzkettige Kohlenwasserstoffe) in Kontakt gebracht um anschließend deren Einfluss auf die katalytische Performance und die morphologische und chemische Änderung der Katalysatoren zu untersuchen.

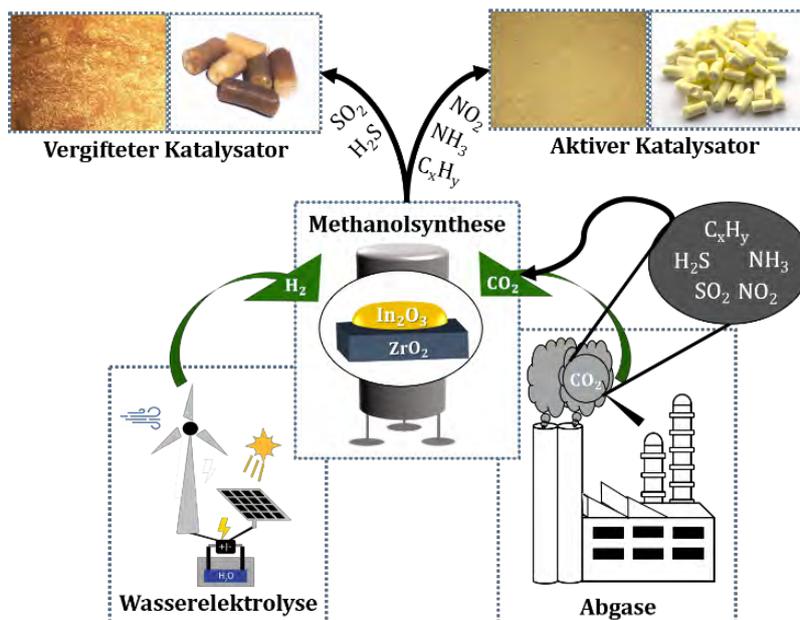


Abbildung 56: Grafische Zusammenfassung der Studien zum Einfluss von Prozessgasverunreinigungen auf die Performance des  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysators im Festbettreaktor

Es konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere schwefelhaltige Komponenten wie  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{SO}_2$  zur Deaktivierung des Katalysators führen, was die Entfernung dieser Verunreinigungen aus  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -Bindungsfähigkeit und zur Vergiftung aktiver  $\text{In}_2\text{O}_3$ -Zentren führt. Gegenüber den untersuchten stickstoffhaltigen Gasen sowie kurzkettigen ( $< \text{C}_5$ ) 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 [7].

Weitere Untersuchungen des Projekts befassten sich mit dem Einsatz  $\text{In}_2\text{O}_3$ -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  $\text{In}_2\text{O}_3$ -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 [8]. Für den Einsatz im Slurry-Reaktor wurden die neuartigen Indium-basierten Katalysatoren angepasst, optimiert und untersucht. Zusammenhänge zwischen katalytischer Aktivität und Zusammensetzung der Katalysatoren konnten aufgeklärt werden. Insbesondere die Rolle von  $\text{ZrO}_2$ -haltigen Katalysatorträgern zur Bindung des Edukts  $\text{CO}_2$  und zur Bereitstellung aktiver Indiumoxid-Sauerstoffstellen stand im Fokus dieser Studien.

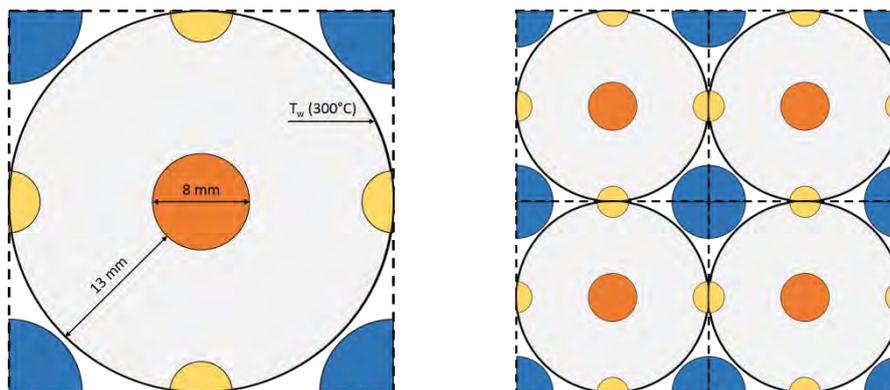
In Kooperation mit dem Lehrstuhl für Technische Chemie I der Universität Duisburg-Essen wurden im Rahmen dieses Projekts erstmals per „gepulster Laserablation in Flüssigkeiten“ (PLAL) hergestellte  $\text{In}_2\text{O}_3$ -Katalysatoren erfolgreich für die  $\text{CO}_2$ -Hydrierung zu Methanol eingesetzt. Das Verfahren der Laserablation, welches sich durch Vorteile wie eine einfache Skalierbarkeit und eine hohe Reinheit der Materialien auszeichnet, ermöglichte die Synthese von geträgertem  $\text{In}_2\text{O}_3$  mit konkurrenzfähiger katalytischer Aktivität. Die Herstellung unterschiedlicher Chargen, bestehend jeweils aus Katalysatoren verschiedener Indiumbeladung auf  $\text{ZrO}_2$ , erfolgte mit unterschiedlichen Syntheseparametern an der Universität Duisburg-Essen. Morphologische und chemische Eigenschaften dieser Katalysatorchargen wurden anschließend mit analytischen Methoden wie XRD, XPS und  $\text{H}_2$ -TPR untersucht. Die Forschungsergebnisse zeigten, dass je nach Einstellung der Laserparameter die Art der Indiumspezies ( $\text{In}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  oder  $\text{In}(\text{OH})_3$ ) sowie deren Kristallisationsgrad und Clustergröße variiert werden können. Der Vergleich zur katalytischen Aktivität dieser Materialien in der Slurry-Methanolsynthese ermöglichte ein tiefergehendes Verständnis grundlegender Struktur-Aktivitäts-Zusammenhänge der per PLAL hergestellten Indium-Katalysatoren. Die detaillierten Forschungsergebnisse konnten im Jahr 2021 in ACS Applied Energy Materials veröffentlicht werden [9].

Zusammenfassend konnten im Rahmen dieses Projekts vielversprechende Indium-basierte Katalysatoren für die erneuerbare Methanolsynthese entwickelt werden. Die Erkenntnisse zum Einfluss der Katalysatorzusammensetzung und der Synthesemethode auf die Aktivität dieser Materialien ermöglicht zukünftig ein gezieltes Design zur Performancesteigerung dieses Katalysortyps. Aus prozesstechnischer Sicht konnte mit dem Indium-basierten System ein insbesondere für die dynamische Methanolsynthese interessantes, wärmpufferndes Slurry-Reaktorkonzept erfolgreich erprobt werden. Die in diesem Projekt erarbeiteten Erkenntnisse zur Beständigkeit der Indium-Katalysatoren gegenüber Prozessgasverunreinigungen aus  $\text{CO}_2$ -Quellen sind entscheidend für einen zukünftigen industriellen Einsatz dieser Systeme.

### 4.3 Dynamische Simulation und Optimierung des Reaktorkonzepts

*Konrad Fischer, Hannsjörg Freund (CRT)*

Am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik wurde das Verhalten des am EVT entwickelten Reaktorkonzepts mittels stationären und dynamischen Simulationen untersucht. Hierzu wurden geeignete mathematische Modelle entwickelt, die in der Lage sind experimentell bestimmte Daten hinreichend genau zu beschreiben. Auf Basis dieser Modelle wurden zum einen geeignete Prozessbedingungen und Steuergrößen für einen lastflexiblen und dynamischen Reaktorbetrieb identifiziert und zum anderen geeignete Methoden zum *Scale-Up* des Reaktors vorgeschlagen.



*Abbildung 57: Links: Abstrahierte Einheitszelle (grau) aus Querschnitt des am EVT entwickelten Reaktorkonzepts. Die Kühlleistung der Heatpipes kann so eingestellt werden, dass sich eine näherungsweise konstante Temperatur ( $T_w$ ) am äußeren Radius der Einheitszelle einstellt. Rechts: „Numbering-up“ von Einheitszellen. Orange: Reaktionskanal; Blau: Heatpipes; Gelb: Vorheizkanäle.*

Durch die stark ausgeprägte Symmetrie des Reaktorkonzepts liegt es nahe, dass eine effiziente Reaktormodellierung dadurch erreicht werden kann, den Reaktor als Summe von Einheitszellen zu beschreiben. Entsprechend dem Vorbild des Einzelrohrs im klassischen Rohrbündelreaktor könnte somit ein einfache *Up-Scaling* des Reaktors durch *Numbering-Up* der Zellen erreicht werden. Die charakteristische Einheitszelle lässt sich aus dem Querschnittprofil des Reaktors ermitteln und stellt einen Kreis mit einem Radius von 17 mm dar, in dessen Zentrum sich ein einzelner, mit Katalysator befüllter Reaktionskanal mit einem Radius von 4 mm befindet (siehe Abbildung 57). Die freigesetzte Reaktionswärme wird über das Reaktormaterial zu den benachbarten Heatpipes und Vorwärmkanälen abgeführt, wodurch sich in erster Näherung eine konstante Temperatur ( $T_w$ ) am äußeren Radius der Einheitszelle einstellt. Damit die Beschreibung des Reaktors als Summe seiner Einheitszellen möglich ist, muss das Verhalten der Reaktionskanäle unabhängig von deren geometrischer Positionierung im Reaktorblock sein. Demnach müssen Reaktionskanäle nahe der Seitenflächen des Reaktorblocks sehr ähnlichen Bedingungen unterliegen wie Reaktionskanäle im Zentrum. Um diese Voraussetzung zu überprüfen und zu verifizieren wurde ein vereinfachtes 3D Modell des Reaktorblocks mittels der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics® erstellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlich positionierten Reaktionskanälen nur gering sind (Abbildung 58). Die Betrachtung einer Einheitszelle zur Modellierung und ein *Scale-Up* über *Numbering-Up* ist also prinzipiell möglich. Bei einem solchem *Scale-Up* muss allerdings auch eine optimierte Kühlung der Heatpipes vorgesehen werden, da hier entsprechend höhere Kühlleistungen erforderlich sind und ein Hitzestau bei den im Reaktorzentrum angebrachten Heatpipes vermieden werden muss.

Zur weiteren Beschreibung und Optimierung des dynamischen Verhaltens des Reaktors wurden Kontinuumsmodelle herangezogen. Solche Modelle können sich hinsichtlich ihrer Komplexität erheblich voneinander unterscheiden. Um die Modellkomplexität zu bestimmen, die für die genaue Beschreibung des Systems notwendig ist, wurde in einer umfangreichen Simulationsstudie das dynamische Verhalten eines gekühlten Rohrreaktors im industriellen Maßstab betrachtet. Der Reaktor wurde mit verschiedenen Modellen beschrieben, die sich hinsichtlich ihrer Dimensionalität und der Beschreibung der Phasen unterscheiden. Ausgehend von einem stationären Betriebspunkt wurde der Volumenstrom am Reaktoreingang sprunghaft um 10% geändert, während weitere Eingangsgrößen konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung des Volumenstroms zwangsläufig eine Verringerung des Umsatzes und eine Abkühlung des Reaktors verursacht. Gründe hierfür sind die verringerte Verweilzeit und eine erhöhte Wärmeabfuhr. Ein

merklicher Unterschied besteht jedoch in der Modellvoraussage der unterschiedlichen Modellkandidaten. Heterogene Modelle sagen deutlich längere Zeiten voraus, bis ein neuer stationärer Zustand erreicht wird. Der Grund sind die Wärme- und Stofftransportwiderstände innerhalb der Katalysatorpartikel, die in quasi-homogenen Modellen vernachlässigt werden. Eine sprunghafte Verringerung des Eingangsvolumenstroms resultiert in einem Temperaturanstieg im Reaktor und einem erhöhten Umsatz. Durch die höhere Verweilzeit steigt der Umsatz, außerdem ist der konvektive Wärmetransport und die Wärmeabfuhr über die Reaktorwand verringert. Größere Sprungänderungen zeigen einen noch stärkeren und schnelleren Temperaturanstieg. Dies führt dazu, dass ein stabiler Betriebspunkt nicht mehr erreicht wird.

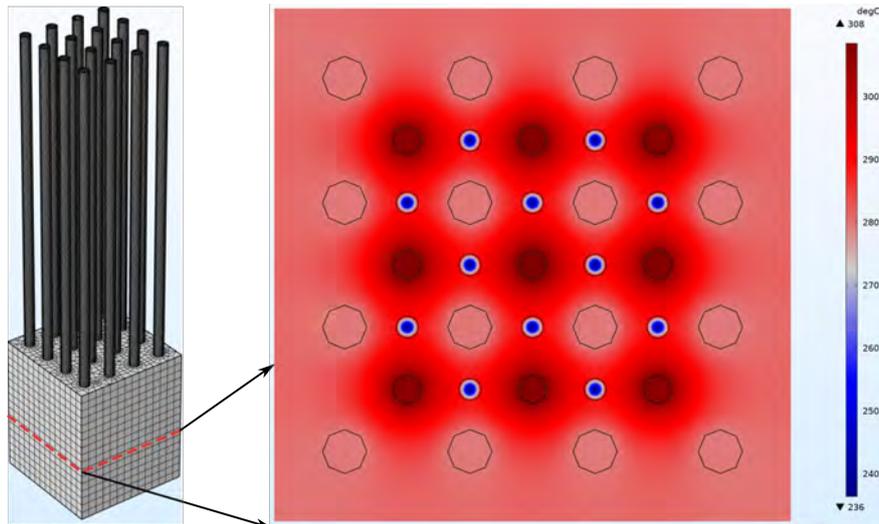


Abbildung 58: Temperaturprofil über den Querschnitt des Reaktorblocks. Die neun Reaktionskanäle (dunkelrot) zeigen untereinander sehr ähnliche Temperaturniveaus.

Das Ergebnis der Simulationsstudie zeigt, dass im Fall großer Transportwiderstände im Katalysatorpellet die Verwendung eines heterogenen Reaktormodells für dynamische Simulationen notwendig ist. Weiterhin wurde verdeutlicht, dass im dynamischen Reaktorbetrieb sowohl Umsatzeinbuße als auch Sicherheitsaspekte entscheidende Herausforderungen darstellen. In weiteren umfangreichen Studien dazu konnte gezeigt werden, dass ein lastflexibler, stabiler dynamischer Reaktorbetrieb durch eine verbesserte Kontrolle weiterer Eingangs- und Betriebsgrößen möglich ist. Hierzu wurden dynamische Optimierungsrechnungen für verschiedene Kombinationen von Freiheitsgraden, z. B. hinsichtlich der Kühlmitteltemperatur und/oder Betriebsstrategien wie Katalysatorverdünnung oder verteilter Eduktzugabe durchgeführt.

Auf Basis der vorausgehenden Erkenntnisse wurde für das am EVT entwickelte Reaktorkonzept ein zweidimensionales, heterogenes Modell zur Beschreibung einer Einheitszelle repräsentativ für den gesamten Reaktor entwickelt. Das Reaktormodell beinhaltet gängige Korrelationen für den Wärme- und Stofftransport im Reaktor und zwischen Gas- und Katalysatorphase. Die Reaktionskinetik der Methanisierungsreaktion wurde mit einem Modell aus der Literatur beschrieben, da keine spezielle Kinetik für den genutzten Katalysator verfügbar war [10]. Die Bilanzgleichungen ergeben ein System aus partiellen Differential-algebraischen Gleichungen, die mit numerischen Methoden gelöst wurden. Die Ergebnisse von stationären Simulationen zeigen einen sehr ausgeprägten Temperaturpeak nahe des Reaktoreingangs sowie große Temperaturgradienten zwischen Reaktorzentrum und –wand (siehe Abbildung 59). Eine wichtige Erkenntnis aus der Simulation ist auch, dass die effektive Reaktionsgeschwindigkeit stark durch Stofftransportprozesse im Katalysatorpartikel beeinflusst wird. Die hohen Temperaturen im Reaktor führen zu hohen Reaktionsgeschwindigkeiten nahe der Katalysatoroberfläche und zu geringen Reaktionsgeschwindigkeiten im Pelletzentrum aufgrund der Stofftransporteinflüsse. Dieser Effekt wird auch durch einen geringen Katalysatorwirkungsgrad deutlich. Eine hinreichende Genauigkeit des Modells konnte durch einen Vergleich mit experimentellen Daten vom EVT sichergestellt werden. Für weitere Entwicklungen des Reaktorkonzepts kann auch eine Verbesserung des Reaktordesigns durch kleinere Katalysatorpartikel empfohlen werden. In kleineren Pellets könnten höhere Wirkungsgrade erzielt werden. Außerdem reduziert sich durch kleinere Pellets der Wärmetransportwiderstand zur gekühlten Reaktorwand, wodurch sich die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor verbessert.

Das dynamische Verhalten des Reaktors wurde wie zuvor kurz erwähnt auf Basis des oben beschriebenen Modells für verschiedene Betriebsszenarien simuliert, was im Folgenden noch näher ausgeführt werden soll. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Untersuchung der Lastflexibilität des Reaktors. Dazu wird ausgehend von einem stationären Betriebspunkt der Feed-Volumenstrom sprunghaft erhöht bzw. reduziert. Eine Erhöhung des Volumenstroms führt zu einer verringerten Verweilzeit des Gasmisches sowie zu einem verbesserten Wärmetransport. Dadurch verringert sich der Umsatz und die Temperatur im Reaktor sinkt (siehe Abbildung 60). Eine Reduktion des Volumenstroms zeigt den gegenteiligen Effekt, wobei die Temperatur im Reaktor steigt und teilweise kritische Bedingungen für den Katalysator erreicht werden. Beide Szenarien sind hinsichtlich der Lastflexibilität des Reaktors kritisch, da sowohl die Produktqualitätsanforderung sowie die Katalysatorspezifikationen nicht eingehalten werden können. Diesem Problem kann durch eine Anpassung der Reaktorkühlung entgegengewirkt werden. Hierzu konnten die Simulationen zeigen, dass durch eine Anpassung der Wandtemperatur der Reaktorbetrieb für dynamische Szenarien stabilisiert werden kann. Die Wandtemperatur kann zum Beispiel über die Kühlung der Heatpipes durch den zugeführten Luftstrom reguliert werden.

Durch die umfangreichen Simulations- und Optimierungsstudien, die im Rahmen des vorliegenden Teilprojektes durchgeführt wurden, konnten wertvolle Erkenntnisse über den sicheren Betrieb lastflexibler Reaktoren im Allgemeinen und Heatpipe-gekühlten Reaktoren im Speziellen gewonnen werden. Die entwickelten Methoden und Modelle bilden darüber hinaus eine zuverlässige Basis für zukünftige Arbeiten in dem hochaktuellen Forschungsbereich des dynamischen Reaktorbetriebs im Kontext der chemischen Energiespeicherung.

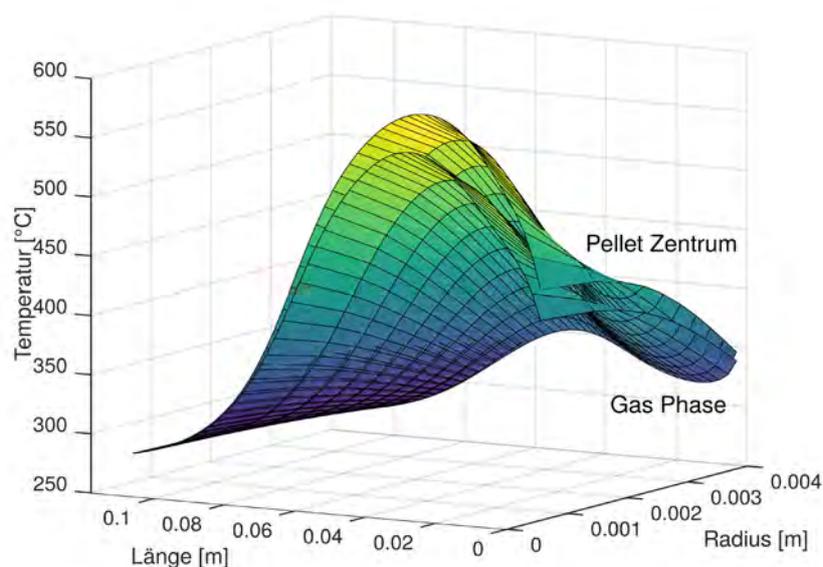


Abbildung 59: Simuliertes, stationäres Temperaturprofil in einem repräsentativen Reaktionskanal. Es liegen ausgeprägte Temperaturunterschiede zwischen Gas- und Katalysatorphase sowie zwischen Reaktorzentrum und –wand vor.

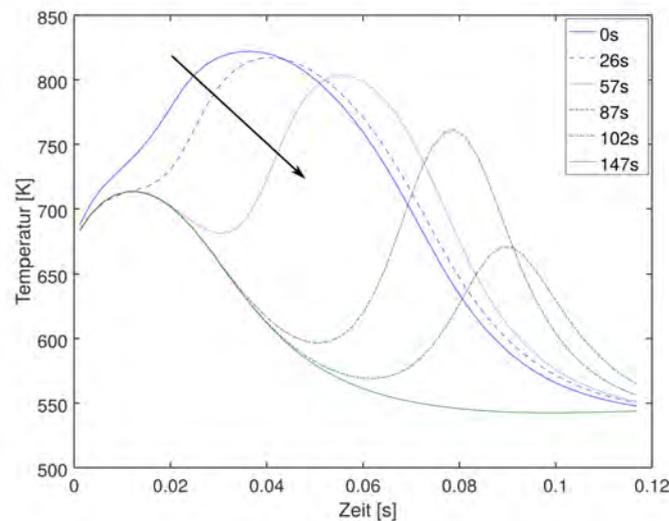


Abbildung 60: Dynamisches Temperaturprofil einer Volumenstromerhöhung im Reaktor. Die Simulation zeigt eine starke Verringerung der Temperatur mit der Zeit.

## 5 Schlussworte

Innerhalb der Laufzeit des EnCN2 konnten die anfangs formulierten technischen und wissenschaftlichen Ziele trotz der Einschränkungen und den letzten beiden Projektjahren erreicht und in einigen Projektbereichen auch wesentliche Impulse für die Verstetigung der Forschungsthemen erzielt werden. Besonders hervorzuheben sind dabei die Vielzahl an neu eingeworbenen Forschungsprojekten für dynamische Synthesen aus dem Teilprojekt SP3 sowie die bevorstehende Demonstration von reversiblen ORC im „Horizon 2020“-Projekt „SolBio-Rev“. Mit dem erfolgreichen Proof-Of-Concepts des Hochtemperatur-Carbonatspeichers beginnen nun auch die Gespräche mit Energieversorgern und Betreibern hinsichtlich der Beantragung einer Förderung für den Aufbau einer Demonstration im Kraftwerksmaßstab und zur weiteren Verwertung der im EnCN gewonnenen Erkenntnisse.

## 6 Vorträge & Poster

- [1] T. Kohler; K. Müller. Analyse des Schmelz- und Kristallisationsverhaltens von  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  in Latentwärmespeichern mittels Computertomographie. Thermodynamik Kolloquium, 2017
- [2] T. Kohler, J. Schmalen, K. Müller. Röntgen-Computertomographie zur Untersuchung von Phasenwechselmaterialien. Thermodynamik-Kolloquium, 2018
- [3] T. Kohler, J. Schmalen, K. Müller. Neue Analysemethoden für latente thermische Energiespeicher. ProcessNet-Jahrestagung, 2018
- [4] T. Kohler, K. Müller. Computertomographische Analyse des Lade- und Entladevorgangs eines latenten thermischen Energiespeichers. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2018
- [5] T. Kohler, K. Müller. Computertomographie zur Analyse latenter Wärmespeicher. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Mehrphasenströmung, 2018
- [6] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Energy storage by  $CO_2$ -hydrogenation to methanol using  $In_2O_3$ -catalysts in fixed-bed and slurry reactors. Hydrogen Dialogue, 2020
- [7] P. Schühle; S. Reichenberger, G. Marzun, J. Albert. Chemical energy storage via Power-to-Liquid: Using slurry phase hydrogenation of  $CO_2$  to methanol. ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2020
- [8] P. Schühle; M. Schmidt, L. Schill, A. Riisager, P. Wasserscheid, J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of  $CO_2$  to methanol using Indium-based catalysts. ProcessNet-Jahrestagung, 2020

- [9] D. Steger, B. Schmitt. Speicherung von Überschussstrom mit einem regenerativen Wärmepumpen-ORC-System. Poster CBI Symposium, 2017
- [10] B. Schmitt, D. Steger, C. Regensburger. Aufwertung von Niedertemperaturwärme mit reversiblen HP-ORC-Systemen. EnCN Sommerkonferenz, 2017
- [11] D. Steger; C. Regensburger; E. Schlücker. Planung einer regenerativen Wärmepumpen-ORC-Anlage. Poster CBI Symposium, 2018
- [12] D. Steger; E. Schlücker. Planung einer reversiblen Wärmepumpen-ORC-Anlage. EnCN Jahreskonferenz, 2018
- [13] D. Steger, C. Regensburger, E. Schlücker: Planung einer regenerativen Wärmepumpen-ORC-Anlage, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt, 6.03.2019 - 7.03.2019
- [14] D. Steger: Design of a reversible Heat Pump-ORC-plant, Recent ORC Research and Applications in Central and Eastern Europe, Amberg, 27/28 Juni 2019
- [15] D. Steger, C. Regensburger, B. Eppinger, S. Will, J. Karl, E. Schlücker: Combining an Organic Rankine cycle and a heat pump cycle in a test plant for reversible storage of energy, 5th International Seminar on ORC Power Systems, Athens, Greece, 9-11. September 2019
- [16] D. Steger, E. Schlücker. Aktueller Stand: Aufbau der Carnot Battery Pilotanlage im EnCN Speicherhaus. EnCN Jahreskonferenz, 2020
- [17] D. Steger, M. Zwiefeler, E. Schlücker. Lubrication management of a reversible compressor-expander-unit in a combined HP-ORC-plant. Presentation at 13<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea, 2020
- [18] D. Steger. Pilotanlage Carnot-Batterie: Planung, Aufbau und Betrieb. Presentation at Workshop Carnot Batterien: Thermische Stromspeicher für die Energiewende. 16.09.2021
- [19] D. Steger, J. Karl, E. Schlücker. Launch and first experimental results of a reversible heat pump-ORC pilot plant as Carnot Battery. Presentation at 6th International Seminar on ORC Power Systems, Munich, 10.-13. October 2021
- [20] M. Neubert; M. Dillig; J. Karl. Erdgas aus Holz. Tag der technischen Fakultät, Erlangen, 2017
- [21] M. Neubert; K. Fischer; P. Schühle; M. Dillig; J. Albert; P. Wasserscheid; H. Freund; J. Karl. Entwicklung eines heatpipe-gekühlten Reaktorkonzepts. EnCN Jahresvollversammlung, Nürnberg, 2017
- [22] M. Neubert; A. Hauser; M. Dillig; J. Karl. Heatpipe-gekühltes Reaktorkonzept für die katalytische Methanisierung in power-to-gas Anwendungen. ProcessNet 2018, Jahrestreffen Fachgruppe EVT, Frankfurt/Main, 07.-08.03.2018.
- [23] M. Neubert; A. Hauser; P. Treiber; J. Karl. Vorschlag einer katalytischen Methanisierung für die kleinskalige dezentrale SNG Erzeugung; DGMK Fachtagung Thermochemische Konversion – Schlüsselbaustein für zukünftige Energie- und Rohstoffsysteme, 23rd - 24th May 2019, Dresden
- [24] S. Markthaler; F. Grimm; J. Karl. Direct catalytic methanation of biogas: From laboratory experiments to demonstration scale. 4<sup>th</sup> Doctoral Colloquium Bioenergy, September 13th/14th, 2021, Eggenstein-Leopoldshafen
- [25] Lange, C.; Müller, D.; Karl, J.: Peak-Load High-Temperature Carbonate Storage. 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Prag, Tschechien, 02.-05.07.2018.
- [26] Lange, C.; Müller, D.; Karl, J.: Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher. ProcessNet 2018, Jahrestreffen Fachgruppe HTT, Bremen, 06.-09.03.2018.

## 7 Veröffentlichungen

- [1] T. Kohler, T. Biedermann, K. Müller. Experimental study of  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  as thermochemical energy storage material. Energy Technology, 6, 1935, 2018dd
- [2] T. Kohler, T. Kögl, K. Müller. Study of the crystallization and melting behavior of a latent heat storage by computed tomography. Chemie Ingenieur Technik, 90, 366, 2018
- [3] P. Schühle; M. Schmidt; L. Schill; A. Riisager; P. Wasserscheid; J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of  $CO_2$  to methanol using Indium-based catalysts, Catalysis Science & Technology 10, 2020 (A)
- [4] P. Schühle; M. Schmidt; L. Schill; A. Riisager; P. Wasserscheid; J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of  $CO_2$  to methanol using Indium-based catalysts, Catalysis Science & Technology 10, 2020 (A)
- [5] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Slurry phase hydrogenation of  $CO_2$  to methanol using supported  $In_2O_3$  catalysts as promising approach for chemical energy storage, Chemie Ingenieur Technik 93, 2021 (C)

- [6] K. Lau; P. Schühle; S.-X. Liang; F. de Kock; J. Albert; S. Reichenberger. Laser-Generated InOx/ZrO<sub>2</sub> Catalysts for CO<sub>2</sub> Hydrogenation: Role of In Situ Fragmentation and Ripening Control, *ACS Applied Energy Materials* 4, 9, 2021 (B)
- [7] D. Steger, C. Regensburger, B. Eppinger, S. Will, J. Karl, E. Schlücker: Combining an Organic Rankine cycle and a heat pump cycle in a test plant for reversible storage of energy, 5th International Seminar on ORC Power Systems, Athens, Greece, 9-11. September 2019
- [8] 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>
- [9] D. Steger, M. Zwiefler, E. Schlücker. Lubrication management of a reversible compressor-expander-unit in a combined HP-ORC-plant. Proceedings of the 13<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference, Jeju, Korea, 2020
- [10] 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. Elsevier *Energy*, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118216.
- [11] D. Steger, C. Regensburger, J. Pham, E. Schlücker. Heat Exchangers in Carnot Batteries: Condensation and Evaporation in a Reversible Device. *MDPI Energies*, DOI: 10.3390/en14185620.
- [12] D. Steger, J. Karl, E. Schlücker. Launch and first experimental results of a reversible heat pump-ORC pilot plant as Carnot Battery. Proceedings of the 6th International Seminar on ORC Power Systems, Munich, 10.-13. October 2021
- [13] S. Staub, P. Bazan, K. Braimakis, D. Müller, C. Regensburger, D. Scharrer, B. Schmitt, D. Steger, R. German, S. Karellas et al. Reversible heat pump-organic Rankine cycle systems for the storage of renewable electricity. *Energies* 2018, 11, doi:10.3390/en11061352.
- [14] B. Eppinger; L. Zigan; S. Will. Simulation of a pumped thermal energy storage based on a reversible HP-ORC-system. Proc. 5th Int. Semin. ORC Power Syst. 2019.
- [15] D. Scharrer; B. Eppinger; P. Schmitt; J. Zenk; P. Bazan; J. Karl; S. Will; M. Pruckner; R. German. Life cycle assessment of a reversible heat pump - organic Rankine cycle - Heat storage system with geothermal heat supply. *Energies* 2020, 13, 1–19, doi:10.3390/en13123253
- [16] 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. *Appl. Energy* 2020, 280, 115940, doi:10.1016/j.apenergy.2020.115940.
- [17] D. Scharrer; B. Eppinger; P. Bazan; L. Zigan; S. Will; German, R. A model for triple generation of cooling, heating and electrical power with a seasonal pumped thermal energy storage. *Proc. Appl. Energy Symp. 2020 Low carbon cities urban energy Syst.* 2020, 10–15.
- [18] B. Eppinger; M. Muradi; D. Scharrer; L. Zigan; P. Bazan; R. German; S. Will. Simulation of the Part Load Behavior of Combined Heat Pump-Organic Rankine Cycle Systems. *Energies* 2021, doi:10.3390/en14133870.
- [19] B. Eppinger; D. Steger; C. Regensburger; J. Karl; E. Schlücker; S. Will. Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant. *Appl. Energy* 2021, 288, 116650, doi:10.1016/j.apenergy.2021.116650.
- [20] K. L. Fischer; M. R. Langer; H. Freund. Dynamic Carbon Dioxide Methanation in a Wall-Cooled Fixed Bed Reactor: Comparative Evaluation of Reactor Models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Volume 58 (42) (2019), 19406-19420
- [21] K. L. Fischer; H. Freund. On the optimal design of load flexible fixed bed reactors: Integration of dynamics into the design problem. *Chemical Engineering Journal*, Volume 393 (2020), 124722
- [22] K. L. Fischer; H. Freund. Intensification of Load Flexible Fixed Bed Reactors by Optimal Design of Staged Reactor Setups. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 159 (2021), 108183
- [23] M. Neubert; P. Treiber; C. Krier; M. Hackel; T. Hellriegel; M. Dillig; J. Karl. Influence of hydrocarbons and thiophene on catalytic fixed bed methanation, *Fuel*, Volume 207, 2017
- [24] M. Neubert; A. Hauser; B. Pourhossein; M. Dillig; J. Karl. Experimental evaluation of a heat pipe cooled structured reactor as part of a two-stage catalytic methanation process in power-to-gas applications, *Appl. Energy*. (2018). doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.
- [25] P. Bazan. Hybrid Simulation of Smart Energy Systems. Dissertation 2017
- [26] P. Dicke; S. Resch; F. Steinbacher; M. Luther; R. German. A versatile and modular modeling framework for diverse storage unit simulations. *Journal of Energy Storage*, 40, 102758, 2021

- [27] K. Hassmann; O. Maye. Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext (KOSiNeK). Cluster Energietechnik, Bayerische Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer mbH, 2020
- [28] D. Steber. Integration of Decentralized Battery Energy Storage Systems into the German Electrical Power System. Dissertation, 2018
- [29] D. Scharrer, M. Pruckner, P. Bazan, R. German. Dynamic modeling and sensitivity analysis of a stratified heat storage coupled with a heat pump and an organic rankine cycle. Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ/Virtuell, 2021
- [30] D. Scharrer; B. Eppinger; P. Schmitt; J. Zenk; P. Bazan; J. Karl; S. Will; M. Pruckner; R. German. Life Cycle Assessment of a Reversible Heat Pump–Organic Rankine Cycle–Heat Storage System with Geothermal Heat Supply. *Energies* 13, 3253, 2020
- [31] D. Scharrer; P. Bazan; R. German. Dynamic simulation of an HP-ORC-Heat Storage pilot plant for an economic evaluation and necessary cost reduction. International Conference on Applied Energy. Bangkok/Virtuell, 2020
- [32] D. Scharrer; B. Eppinger; P. Bazan; L. Zigan; S. Will; R. German. A model for triple generation of cooling, heating and electrical power with a seasonal pumped thermal energy storage. Applied Energy Symposium: Low carbon cities and urban energy systems. *Tokyo/Virtuell*, 2020

## 8 Patente

- [1] P. Dicke; B. Schricker; F. Steinbacher. Verfahren zum Simulieren eines Batteriesystems durch Vorgeben einer Diffusionsrate während eines Lade-/Entladeprozesses sowie elektronische Recheneinrichtung.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] J. Zhong; X. Yang; Z. Wu; B. Liang; Y. Huang; T. Zhang. State of the art and perspectives in heterogeneous catalysis of CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol, *Chemical Society Reviews* 49, 5, 2020
- [2] M. V. Twigg; M.S. Spencer. Deactivation of supported copper metal catalysts for hydrogenation reactions, *Applied Catalysis A: General* 212, 1-2, 2001
- [3] M. V. Twigg. Deactivation of copper metal catalysts for methanol decomposition, methanol steam reforming and methanol synthesis, *Topics in Catalysis* 22, 2003
- [4] B. Liang; J. Ma; X. Su; C. Yang; H. Duan; H. Zhou; S. Deng; L. Li; Y. Huang. Investigation on Deactivation of Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for CO<sub>2</sub> Hydrogenation to Methanol, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 58, 21, 2019
- [5] O. Martin; A.J. Martín; C. Mondelli; S. Mitchell; T.F. Segawa; R. Hauert; C. Drouilly; D. Curulla-Ferré; J. Pérez-Ramírez. Indium Oxide as a Superior Catalyst for Methanol Synthesis by CO<sub>2</sub> Hydrogenation, *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 55, 21, 2016
- [6] T.-y. Chen; C. Cao; T.-b. Chen; X. Ding; H. Huang; L. Shen; X. Cao; M. Zhu; J. Xu; J. Gao; Y.-F. Han. Unraveling Highly Tunable Selectivity in CO<sub>2</sub> Hydrogenation over Bimetallic In-Zr Oxide Catalysts, *ACS Catalysis* 9, 2019
- [7] P. Schühle; M. Schmidt; L. Schill; A. Riisager; P. Wasserscheid; J. Albert. Influence of gas impurities on the hydrogenation of CO<sub>2</sub> to methanol using Indium-based catalysts, *Catalysis Science & Technology* 10, 2020
- [8] P. Schühle; S. Reichenberger; G. Marzun; J. Albert. Slurry phase hydrogenation of CO<sub>2</sub> to methanol using supported In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts as promising approach for chemical energy storage, *Chemie Ingenieur Technik* 93, 2021
- [9] K. Lau; P. Schühle; S.-X. Liang; F. de Kock; J. Albert; S. Reichenberger. Laser-Generated InOx/ZrO<sub>2</sub> Catalysts for CO<sub>2</sub> Hydrogenation: Role of In Situ Fragmentation and Ripening Control, *ACS Applied Energy Materials* 4, 9, 2021
- [10] J. Xu, G. F. Froment, "Methane steam reforming: II. Diffusional limitations and reactor simulation", *AIChE Journal* 35(1) (1989) 97-103.
- [11] G. Malherbe, J.-F. Henry, A. El Bakali, C. Bissieux, S. Fohanno, *J. Phys. Conf. Ser.* **2012**, 395, 012081.
- [12] S. Alvarado, E. Marín, A. G. Juárez, A. Calderón, R. Ivanov, *Eur. J. Phys.* **2012**, 33, 897.
- [13] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Derzeit unverzichtbar für eine verlässliche Energieversorgung.

URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/konventionelle-energetraeger.html> (zuletzt abgerufen am 24.10.2021). 2021

- [14] Umweltbundesamt. Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeverbrauch-und-erzeugung-nach-sektoren> (zuletzt abgerufen am 26.10.2021). 2021
- [15] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Energieverbrauch in Deutschland: Daten für das 1. bis 4. Quartal 2020. 2020
- [16] M. Neubert, A. Hauser, B. Pourhossein, M. Dillig, J. Karl, Experimental evaluation of a heat pipe cooled structured reactor as part of a two-stage catalytic methanation process in power-to-gas applications, Appl. Energy. (2018). doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.

# SPEICHER B

## Projektbericht 2017 - 2021

Das Ziel des Projektes Speicher B, bis 2022 in Rahmen der LOHC-Technologien Systeme und Technologien zu entwickeln, die insbesondere für eine dezentrale Anwendung geeignet sind und die Möglichkeit zur Speicher-Wärme-Kopplung eröffnen, konnte mit Erfolg umgesetzt werden. In den drei Teilprojekten des Speicher B – Projektes wurden drei wesentliche Bestandteile betrachtet: Zum einen wurde die Speichertechnologie für stationäre Anwendungen weiterentwickelt. Zum anderen lag der Fokus auf der Entwicklung und Optimierung wesentlicher Aspekte für die Nutzung der Technologie in der Wasserstofflogistik inklusive einer geschickten Kopplung der LOHC-Technologie mit anderen Technologien. Damit wurde die große Bandbreite der Anwendbarkeit von LOHC-Anlagen demonstriert. Im Rahmen des Projektes Speicher B wurde so z.B. die geschickte Verschaltung von BHKWs mit dem LOHC-Prozess untersucht.

Diese zweite Förderphase baute auf die in der ersten Förderphase entwickelten Kompetenzen im EnCN auf und hat so die Arbeit in neuen Förderprojekten erfolgreich weitergeführt. Insbesondere die Vernetzung der Themenschwerpunkte untereinander wurde verstärkt. Die vorhandenen Kompetenzen und die Infrastruktur konnten erfolgreich im Rahmen von neuen Verbundprojekten des Freistaats Bayern mit Fördermitteln strategisch um neue Kompetenzfelder erweitert und ergänzt werden.

Der Energie Campus und der Standort Nürnberg boten für diese Vorhaben ein optimales Umfeld. Durch die am EnCN beteiligten Lehrstühle für Chemische Reaktionstechnik, Prozessmaschinen und Anlagentechnik und Technische Thermodynamik konnte die technische Entwicklung von LOHC-Reaktionssystemen in allen relevanten Aspekten abgebildet werden. Die hohe Expertise des Erlangen Center for Interface Research and Catalysis auf dem Gebiet thermochemischer Energiespeicher erweiterte den prozesstechnischen Handlungsraum insbesondere der stationären, LOHC-basierten Wasserstoffspeicherung.

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 bot auch dem Projekt Speicher B 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

Zentrales Element einer zukunftsfähigen Energieversorgung bilden Speichertechnologien, die in der Lage sind, den weiter steigenden Anteil erneuerbarer Energien wirksam, effizient und kostengünstig zu besichern und aus erneuerbarer Energieäquivalenten volkswirtschaftlichen Nutzen zu generieren. Durch Elektrolyse erzeugter Wasserstoff kann Überschussenergie chemisch speichern. Dieser Wasserstoff lässt sich wiederum sicher und effizient gebunden in LOHCs speichern und transportieren. Hierbei wird das Speichermedium LOHC nach Bedarf mit dem Wasserstoff hydriert oder dehydriert.

### 1.1 Optimierung der Reaktionsprozesse

Ein wesentlicher Ansatzpunkt für die Optimierung der Hydrierung und Dehydrierung ist die Katalyse. Um die Reaktionswärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau freisetzen zu können, sollte die Hydrierung bei möglichst hohen Temperaturen erfolgen. Es konnte ein Katalysator entwickelt werden, der die Hydrierung bei Temperaturen

oberhalb von 200 °C ermöglicht, ohne eine nennenswerte Degradation des LOHC-Materials. Durch eine spezielle Modifikation der Katalysatoroberfläche kann dieser Katalysator sowohl hydrieren als auch dehydrieren. Diese Katalysatorneuentwicklung ist die Basis für die Erweiterung des, zuvor ebenfalls am EnCN entwickelten, oneReactor-Konzeptes. Bei diesem sollen Hydrier- und Dehydrierreaktion abwechselnd im selben Reaktor durchgeführt werden. Das Konzept reduziert die Investitionskosten erheblich und soll in Kombination mit geeigneten Wärmespeichern, welche ebenfalls im Projekt Speicher B untersucht wurden, eine Wärmeintegration ermöglichen. Insbesondere die Hochtemperatur-Wärmespeicher sind für das oneReactor – oneTemperature Konzept von besonderem Interesse, da die Hydrierwärme so für einen nachfolgenden Dehydrierschritt zwischengespeichert werden könnte. Die prozessinterne Nutzung der Energie würde verglichen mit vollständig externer Zuführung der Reaktionswärme eine Erhöhung des Wirkungsgrads erzielen. Aus zeitlichen Gründen konnte die Verschaltung von Wärmespeicher und oneReactor-Konzept jedoch bisher noch nicht an einer gemeinsamen Versuchsanlage demonstriert werden. Stattdessen fand eine getrennte Betrachtung der Systeme statt.

Der oneReactor ist ein wesentlicher Teil der Arbeiten im „Speicherhaus“. Das „Speicherhaus“ ist ein Energieforschungslabor, in dem verschiedene Technologien aus Speicher B sowie Speicher A untersucht werden. Da die für das „Speicherhaus“ vorgesehene Halle 13 während der ersten Förderphase nicht als chemisches Labor genutzt wurde, musste zunächst der Umbau der Halle geplant werden. Dabei waren intensive Abstimmungen zwischen allen beteiligten Arbeitsgruppen nötig, um ein Konzept für den Umbau zu entwickeln, mit dem der Betrieb sämtlicher neuen Anlagen möglich ist und das auch mit dem knappen Budget durchführbar ist.

Während der Planungs- und Umbauarbeiten wurden kleinere Versuchsanlagen für kinetische Untersuchungen und zur Untersuchung der zyklischen Hochtemperatur-Hydrierung und –Dehydrierung aufgebaut. Es zeigte sich, dass der verwendete Katalysator nach zwei Wochen Standzeit bei durchgehend hohen Temperaturen noch mehr als die Hälfte der Anfangsaktivität aufweist. Werden die Nebenproduktanteile über die einzelnen Zyklen hinweg betrachtet, wird deutlich, dass die Anteile nach Hydrierung wie auch nach Dehydrierung mit zunehmender Zyklenzahl zunehmen. Die in einer Woche in Semi-Batch-Fahrweise realisierten Kontaktzeiten von LOHC und Katalysator stellten ein Vielfaches derer in kontinuierlichen Anlagen dar. Während das LOHC in den gezeigten Versuchen über die gesamte Versuchszeit bei hohen Temperaturen mit dem Katalysator kontaktiert wird, ist der Trägerstoff bei kommerziellen, kontinuierlichen LOHC-Anlagen pro Hydrierung/Dehydrierung lediglich einige Minuten in Kontakt mit dem Katalysator. Die durchgeführten Experimente entsprechen daher der hundert- bis tausendfachen Nutzung des Trägermaterials.

Zur Untersuchung des oneReactor – oneTemperature Konzeptes im Technikumsmaßstab wurde ein Reaktorsystem konzipiert und ausgelegt. Die gesamte Anlage wurde in enger Zusammenarbeit mit Hydrogenious Technologies geplant und von Hydrogenious Technologies gebaut. Die Anlage basiert in weiten Teilen auf Arbeiten, die zuvor am EnCN im Rahmen des LZE-Pilotprojektes P1 durchgeführt wurden.

Bei dem Herzstück der Anlage handelt es sich um einen vertikalen Rohrbündelreaktor. 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 zu dosiert (Aufwärtsströmung). 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. Es wird die Gasmenge erfasst, die bei der Dehydrierung freigesetzt, 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 LOHC 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 (Perhydro )Dibenzyltoluol, kurz HX-DBT. Die Dehydrierung wurde in einem Temperaturbereich von 270-310 °C und Drücken von 2-5 bar<sub>a</sub> durchgeführt. Es war möglich, die erzielten Wasserstofffreisetzungen und Dehydriergrade zu reproduzieren. Hydrierversuche wurden bei Temperaturen von 220-290 °C und Drücken von 20-35 bar<sub>a</sub> durchgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass die erzielten Hydriergrade wesentlich von der Flüssigverteilung im Rieselbett und der Benetzung des Katalysators abhängen. Das verwendete LOHC System HX-DBT zeichnet sich dadurch aus, dass es aus drei Bausteinen cyclischen Kohlenwasserstoffs

besteht. Es konnte beobachtet werden, dass für die Hydrierung des dritten aromatischen Rings eine deutlich erhöhte Verweilzeit des LOHC im Reaktor nötig ist. Es ist davon auszugehen, dass bei Umstellung des LOHC-Materials auf ein zwei-Ring-System in Form von (Perhydro-)Benzyltoluol, kurz HX-BT, eine Steigerung des erzielten Hydrierhubs bereits bei geringeren Verweilzeiten erzielt werden kann.

Es wurden Optimierungen an der Bauweise des Reaktors vorgenommen und weitere Messtechnik zur Erfassung der Temperaturverteilung in der Reaktionszone gefertigt und eingebaut. Ebenso erfolgt ein Wechsel des Katalysators hin zum aktuellen Stand der Technik. Im neuen Aufbau sind weitere Versuchsreihen geplant, deren Schwerpunkte unter anderem auf der Zyklenstabilität von HX-BT, der Reinheit des freigesetzten Wasserstoffs sowie auf An- und Abfahrstrategien der Technikumsanlage liegen.

## 1.2 Anlage zur automatisierten und standardisierten Katalysatorcharakterisierung

Die unabhängige Bewertung verschiedener Katalysatorsysteme ist ein entscheidender Baustein der Katalysatorentwicklung. Hierzu wurde eine Laboranlage entwickelt, an der bei höchstmöglichem Automatisierungsgrad standardisierte Experimente zur Dehydrierung von flüssigen Wasserstoffträgern (LOHC) über Edelmetallkatalysatoren durchgeführt werden können. Somit können Aussagen über Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit verschiedener Reaktionssysteme getroffen werden.

Da die Kinetik einer chemischen Reaktion exponentiell von der Temperatur abhängt, liegt ein besonderer Fokus des Messaufbaus auf der Temperierung des Reaktionssystems. Der Laborreaktor wurde mitsamt einem Teil der Reaktorperipherie in den Heißluftofen eines ehemaligen Gaschromatographen eingebracht. Dies ermöglicht das automatisierte Anfahren verschiedener Temperaturstufen. Die definierte Zufuhr von frischem, mit Wasserstoff beladenem LOHC in den Reaktionsraum erfolgt über eine Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC)-Pumpe. Die entsprechende Wasserstofffreisetzungsrate wird mittels geeignetem Massendurchflussmesser (MFM) bestimmt. Zusätzlich ist dem Reaktor, zur Untersuchung des Einflusses des Systemdrucks auf die Reaktion, ein Druckhalteventil nachgeschaltet. (vgl. Abbildung 1)

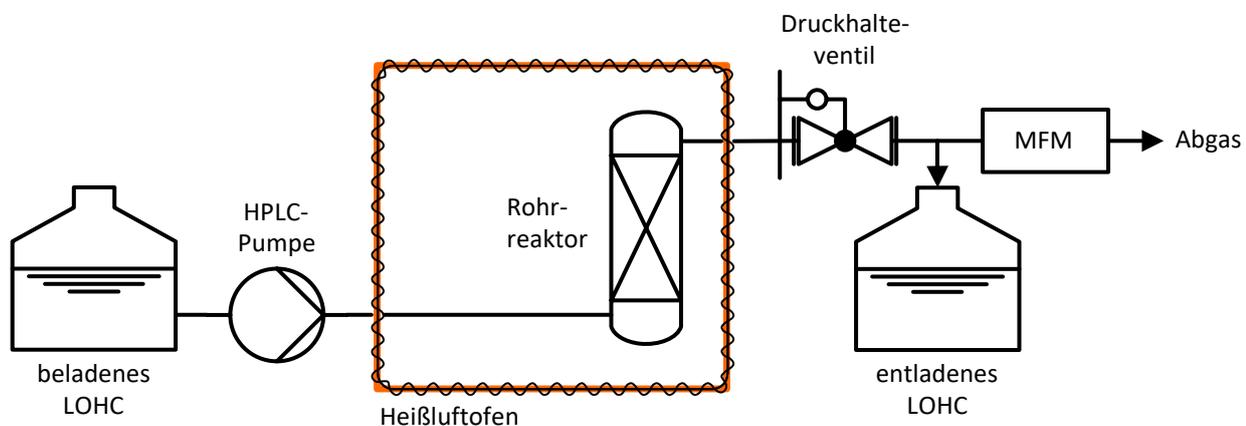


Abbildung 1: Vereinfachtes Fließbild der Laboranlage

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 Rohrdurchmesser 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.<sup>1,2</sup>



Abbildung 2: Gesamtaufbau der Laboranlage im Wasserstofftechnikum

Im Laufe des Jahres 2019 wurde die Laboranlage aufgebaut und im Wasserstofftechnikum in Betrieb genommen (vgl. Abbildung 2). Erste Experimente zur Charakterisierung des Ansprechverhaltens der Anlage auf variierende Betriebsparameter wurden durchgeführt. Hierbei wurde das LOHC-System Perhydrodibenzyltoluol/Dibenzyltoluol (H18-DBT/H0-DBT) eingesetzt. Im Laufe der Inbetriebnahme wurde unter anderem die Reaktorperipherie im Ofenraum (Abbildung 3) angepasst, um im Betrieb auftretende Temperaturunterschiede zwischen den Messstellen (TIR) an Reaktoreinlass und -auslass zu verringern. Hiervon unverändert blieb die Möglichkeit der Online-Aufzeichnung von Druck (PIR) und Druckverlust (PDIR) im Reaktor.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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.

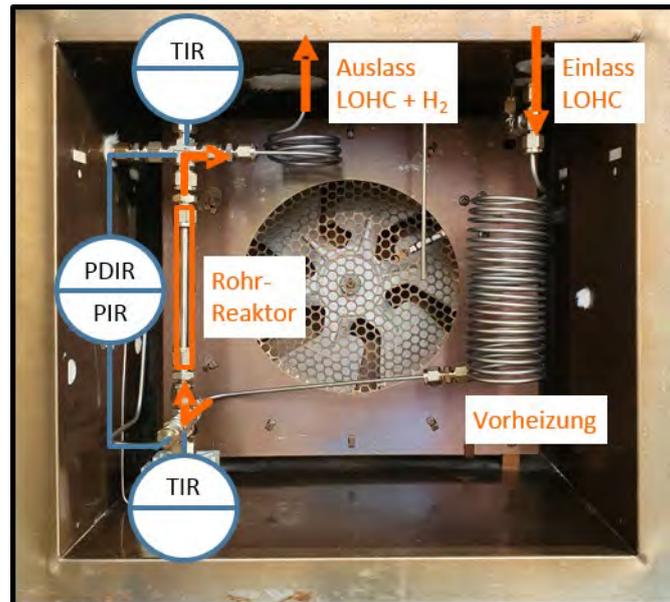


Abbildung 3: Reaktor und Peripherie im Ofenraum der Laboranlage

Nach dem pandemiebedingten wissenschaftlichen Shutdown 2020 wurde die Anlage auf das vielversprechende LOHC-System Perhydrobenzyltoluol/Benzyltoluol (H12-BT/H0-BT) umgestellt. Mit einem konventionellen Katalysator (0.3 wt% Pt/AlOx) wurden Untersuchungen zu dessen Langzeitaktivität durchgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 4 der Verlauf der Platinproduktivität  $P$  des Katalysators über dessen erste 70 Betriebsstunden bei einem Versuch mit definierten Bedingungen aufgezeigt.

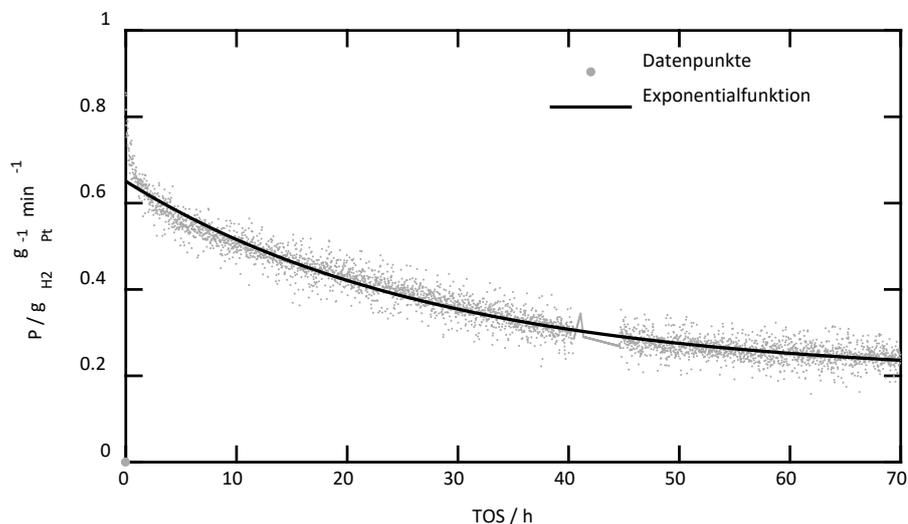


Abbildung 4: Versuchsaufzeichnung während der Untersuchung zur Langzeitaktivität eines Katalysators. Versuchsbedingungen:  $m_{\text{Kat}} = 514 \text{ mg}$  ( $3.15 \text{ mm} \leq d_p \leq 3.55 \text{ mm}$ ),  $m_{\text{H12-BT}} = 0.3 \text{ g min}^{-1}$  ( $\text{DoH} > 95 \%$ ),  $T = 285 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 1.5 \text{ bar}_u$ ,  $X < 10 \%$

Deutlich zu erkennen ist eine stetige Abnahme der Wasserstofffreisetzung über die Zeit. Ein ähnliches Reaktionsverhalten konnte schon während der Inbetriebnahme beobachtet werden. Verläufe dieser Art lassen sich über Exponentialfunktionen zweiter Ordnung abbilden.<sup>3</sup> Mittels deren Koeffizienten können Aussagen zu Deaktivierungsgeschwindigkeit

<sup>3</sup> 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.

und Aktivitätsverlust des Katalysators getroffen werden. Dies dient dem Vergleich verschiedener Deaktivierungsverläufe untereinander. Weitere experimentelle Daten deuten stark darauf hin, dass sich der Verlust an Katalysatoraktivität durch Veränderung der Betriebsbedingungen beeinflussen lässt.

Im laufenden Kalenderjahr 2021 konnten mögliche Ursachen für die festgestellte Katalysatordeaktivierung identifiziert werden. Dies ermöglichte die Entwicklung von Methoden zur teilweisen Regenerierung des Katalysatorbetts. Außerdem kann durch den Einsatz geeigneter Behandlung des eingesetzten LOHCs und Katalysators die Geschwindigkeit des Aktivitätsverlusts bei definierten Reaktionsbedingungen deutlich reduziert werden.

Erste Versuche gegen Ende des Jahres zeigen auf, dass mit Hilfe der generierten Erkenntnisse eine, für die Aufnahme verlässlicher kinetischer Daten, ausreichend stabile Betriebsweise realisierbar ist. Somit besteht in Zukunft die Möglichkeit der zeit- und kostenschonenden Bewertung verschiedenster LOHC-/Katalysatorsysteme am Standort.

### 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 Reaktanten 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. Unser Fokus liegt auf Reaktionssystemen, welche auf Feststoffen basieren. In Tab. 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	$CaCl_2 + n H_2O \rightleftharpoons CaCl_2 \cdot nH_2O + \Delta H_R$	< 200 °C
Magnesiumoxid - Wasser	$MgO + H_2O \rightleftharpoons Mg(OH)_2 + \Delta H_R$	250 - 350 °C
Zeolith Y (NaY) - Wasser	$NaY + n H_2O \rightleftharpoons NaY \cdot nH_2O + \Delta H_R$	100 - 300 °C

Das Ziel war die Entwicklung eines effizienten, langzeitstabilen Speichers mit einer möglichst hohen Speicherkapazität. In der Literatur wurden bereits die Kinetik, Thermodynamik und Beständigkeit der Reaktionssysteme  $CaCl_2/H_2O$  <sup>4</sup>[1] und  $MgO/H_2O$  <sup>5</sup>[2] eingehend analysiert. Allerdings wurde beim Einsatz der reinen Salze oder Metalloxide bei wiederholten Speicherzyklen Agglomeration und Sinterung der Partikel beobachtet. Wodurch der Reaktionsumsatz und somit die freiwerdende Wärme stark abnimmt. Außerdem führt dies zu weiteren verfahrenstechnischen Problemen wie schlechten Wärme- und Stofftransporteigenschaften. Allgemein kann keine hinreichende Zyklenstabilität der so eingesetzten Reaktanten/Materialien erzielt werden. Deshalb wurde versucht Magnesiumoxid und Calciumchlorid in poröse Trägermaterialien einzubringen, um eine Verbesserung des Wärme- und Stofftransports, sowie der Zyklenstabilität durch Verhinderung von Agglomeration und Sinterung zu erreichen. Unser Schwerpunkt lag auf Wasser als Wärmeüberträger und Reaktant, d.h. es wurde für die Energiespeicherungen eine Dehydratisierungs- und für die Entladung eine

<sup>4</sup> M. Molenda et al., *Thermochimica Acta*, 2013, 560, 76-81.

<sup>5</sup> P. Pardo et al., *Solar Energy*, 2014, 107, 605-616.

Hydratisierungsreaktion durchgeführt. Ein anderer Ansatzpunkt waren reine Adsorptions- und Desorptionsprozesse von Wasser an porösen Materialien wie Zeolithen<sup>6</sup> [3].

Mit Hilfe der selbstgebauten Testanlage zur Untersuchung von thermochemischen Energiespeicher und der STA (Simultane Thermische Analyse) mit TG-DSC-Sensor (Thermogravimetrie, Dynamische Differenzkalorimetrie, engl. *differential scanning calorimetry*) konnten viele interessante Ergebnisse und neue Erkenntnisse für die Auswahl und Optimierung eines geeigneten thermochemischen Speichermaterials gefunden werden.

Zunächst wurden unterschiedliche Imprägnierungsmethoden für Magnesiumoxid und Calciumchlorid auf poröse Materialien wie Aktivkohlen, Aluminiumoxid, Zeolithe und speziell synthetisierte mesoporöse Silikate (SBA-15) als Trägermaterialien getestet. Außerdem wurden verschiedene Beladungen durchgeführt um ein Optimum zwischen freiwerdender Wärme, Stofftransporteigenschaften und Zyklenstabilität zu finden.

Die Imprägnierung poröser Materialien führte allerdings zu einigen Problemen wie z.B. das Auskristallisieren der Salze auf der Oberfläche der Träger oder zu hohen Beladungslimitierungen. Deshalb wurden neue Synthesestrategien entwickelt, bei denen die Reaktanten wie bspw. Magnesiumoxid zunächst in Form von Nanopartikel synthetisiert wurden (Abb. 1). Anschließend wurde mit Hilfe von (organischen) Vorläuferverbindungen die Partikel in eine poröse kohlenstoffbasierte Matrix (Träger) eingebaut, indem diese um und zwischen einzelnen Partikeln wächst (Abb. 2). Durch die Synthesemethode konnte bei vertretbare Energiedichten die Agglomeration der Partikel und somit die Zyklenstabilität erheblich verbessert werden. Das Trägermaterial wurde vor allem durch Carbonisierungen von unterschiedlichen Kohlenstoffmaterialien erzeugt.

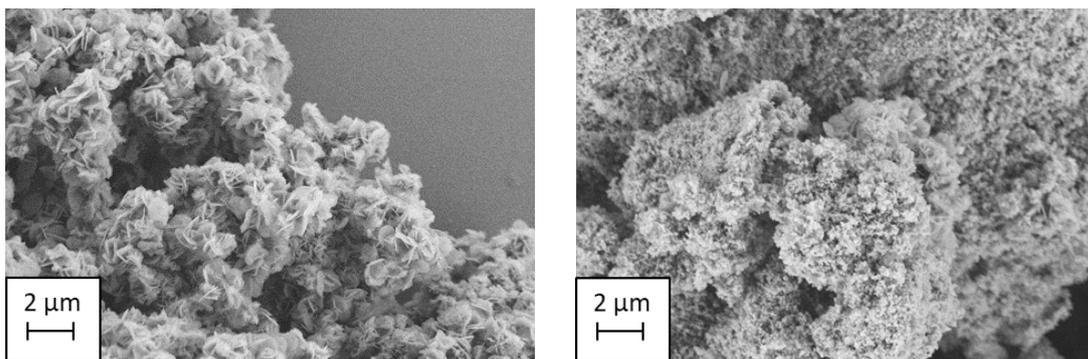


Abbildung 5: Agglomerate der synthetisierten MgO-Partikel: links plättchenförmig, rechts sphärisch.

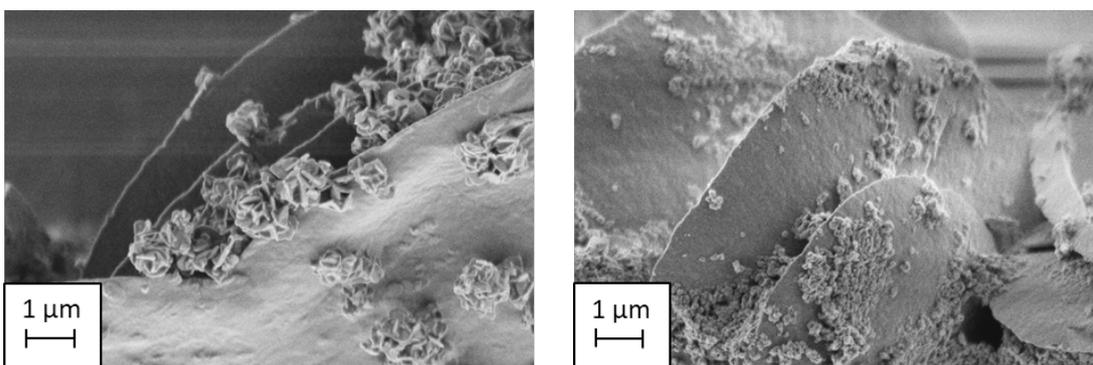


Abbildung 6: Verkapselte MgO-Partikel mit mikroporösen Kohlenstoffverbindungen: links plättchenförmig, rechts sphärisch.

Außerdem konnten vielversprechende Ergebnisse mit Zeolithen als rein sorptive Speichersysteme auch in einem hohen Temperaturbereich identifiziert werden. Für einen NaY-Zeolith wurde bspw. bei einer isothermen Reaktortemperatur von 150 °C über 30 Zyklen eine konstante Massenzu- und -abnahme von ca. 20 Gew.-% für den Ad- bzw. Desorptionsprozess von Wasser mittels STA-Messung detektiert. Zudem wurde ein konstanter Wert für die

<sup>6</sup> A. Ristić et al., *J. Mater. Chem. A* 2018, 6, 11521.

Adsorptionsenthalpie von ca.  $600 \text{ Jg}^{-1}$  bei isothermer Fahrweise (Trocknung bei  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und ca.  $800 \text{ Jg}^{-1}$  nachdem dem Ausheizen (Trocknung bei  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ; alle 10 Zyklen) festgestellt (Abb. 3). Durch verschiedene Modifikationen konnte die Adsorptionsenthalpie zusätzlich erhöht werden, wobei die Zeolithe weiterhin eine hohe Zyklenstabilität aufwiesen.

Daneben wurden zeitabhängige Wärmeprofile eines Festbettreaktors mit Zeolithschüttung erstellt, um ein besseres Verständnis für das Ad- bzw. Desorptionsverhalten im Anwendungsfall zu erhalten, so dass in Zukunft eine optimale Wärmeintegration möglich wird.

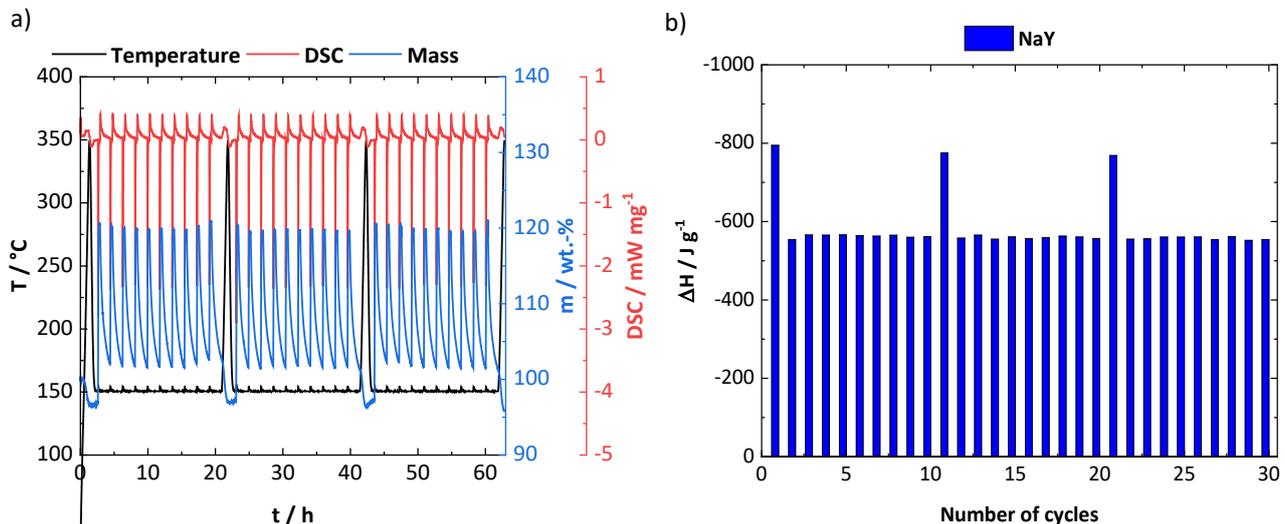


Abbildung 7: 30-Zyklen-Experiment a) STA-Messung vom NaY-Zeolith; die Befeuchtungszeit mit Wasserdampf ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt, tritt jedoch immer bei der Massenzunahme für 20 min auf. b) Resultierende Adsorptionsenthalpie ( $\Delta H$ ) für NaY bei  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Es wurde mehrere Lösungsansätze zur Entwicklung eines effizienten thermochemischen Energiespeichers untersucht. Eine Imprägnierung von porösen Materialien führte nicht zu den gewünschten Ergebnissen. Die gezielte Synthesestrategie für Kompositmaterialien aus MgO-Partikeln in einer porösen Kohlenstoffmatrix konnte die bisherigen Probleme beim Einsatz von reinem Pulver teilweise lösen. Außerdem wurden mit modifizierten Zeolithen vielversprechende Ergebnisse erhalten. Als nächster Schritt könnte/sollte die Integration eines thermochemischen Speichers in eine LOHC-Anlage bspw. im One-Reaktor-Konzept<sup>7</sup> [4] erarbeitet und getestet werden.

Im Bereich der Wärmespeicherung und -transformation bestehen aktuell mehrere Industriekooperationen. Im Vordergrund stehen hierbei insbesondere die Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Wand, Aktivkomponente und Träger. Daneben wurden weitere Forschungsanträge zum Thema thermochemische Speichermaterialien aus Zeolithen im Verbund mit möglichen Kooperationspartnern gestellt.

#### 1.4 Systemanalytische Untersuchung der LOHC-Technologie

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zur Einordnung der Technologie drei grundsätzliche Fragestellungen behandelt: Die Integration von Wärmespeichern in LOHC-Systemen, die Dynamik von LOHC-Systemen und ihre Zuverlässigkeit.

Die Evaluierung von Konzepten zur Speicherung der Hydrierwärme zur späteren Dehydrierung zeigte, dass das Volumen der Wärmespeicher so groß wäre, dass es den Speicherdichtenvorteil der Wasserstoffspeicherung auf LOHCs konterkarieren würde. Das kombinierte Volumen von LOHC, Wärmespeicher und Freisetzungseinheit ist größer als das eines Druckwassertanks mit gleichem Energieinhalt. Dementsprechend muss konstatiert werden, dass Zwischenspeicherung der Hydrierwärme für die anschließende Dehydrierung nicht zielführend ist. Der Fokus der weiteren Arbeiten wurde daher auf die weiteren Fragestellungen gelegt.

Die Anpassungsgeschwindigkeit von LOHC-Systemen auf Lastwechsel (und damit die darstellbare Dynamik der Energiebereitstellung) wird einerseits durch die Trägheit der chemischen Freisetzungseinheit bestimmt. Auf der anderen

<sup>7</sup> H. Jorschick et al., *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 1652.

Seite kann durch die Änderung des Druckniveaus des freien Wasserstoffs zwischen Freisetzung und Brennstoffzelle ein Puffer erzeugt werden, der eine erhöhte Dynamik erlaubt.

Bei Lastprofilen von Haushalten treten häufig Sprünge im Strombedarf auf. Soll der Strombedarf eines Haushalts mit einer PV-Anlage und einem LOHC-System gedeckt werden, so müssen diese Sprünge kompensiert werden. Dies ist mit Hilfe des freien Wasserstoffvolumens zwischen Dehydrierer und der Brennstoffzelle möglich. Zu klären ist die Frage, wie groß dieses Volumen sein muss, damit die Nachfrage an Strom nicht nur integral gedeckt werden kann, sondern auch zum konkreten Zeitpunkt. Um dieses Volumen bestimmen zu können, wurde eine Simulation mittels MATLAB Simulink durchgeführt. Zur Parametrisierung des dynamischen LOHC-Modells wurden Messdaten aus einem vorangegangenen Projekt verwendet.<sup>8</sup>

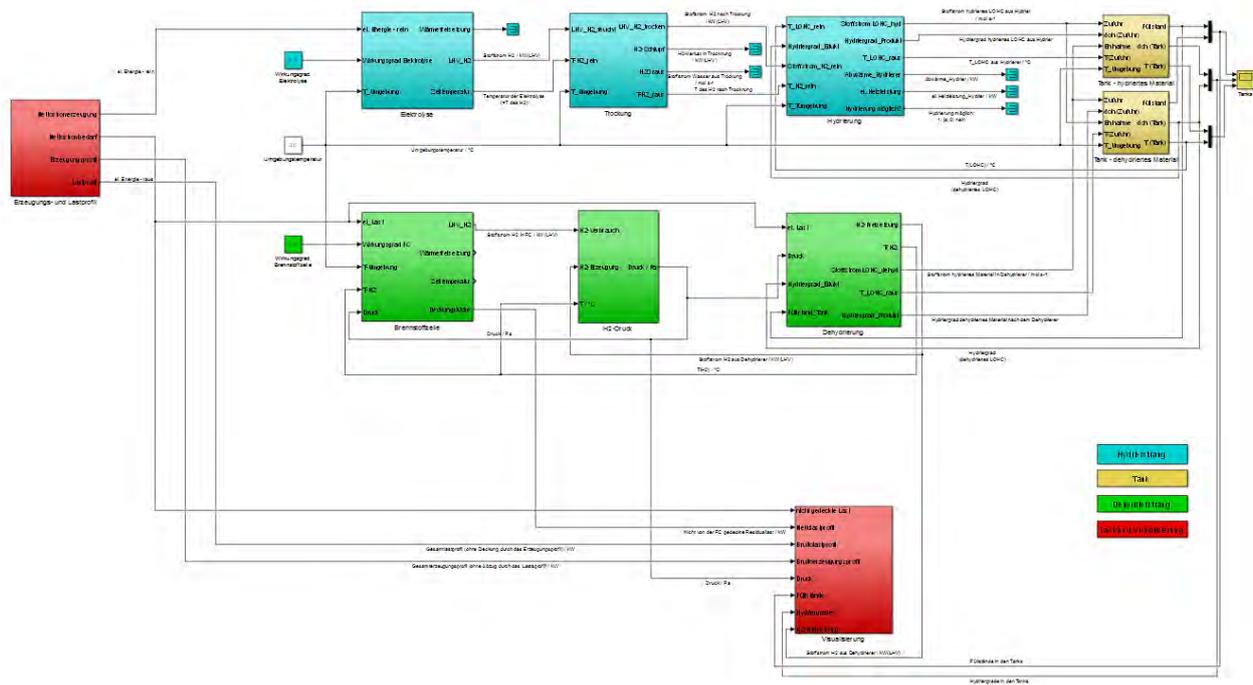


Abbildung 8: Dynamisches Simulationsmodell eines Energiespeichers auf LOHC-Basis (oberste Ebene; unterhalb jedes der gezeigten Blöcke befinden sich weitere logische Ebenen der Modellierung)

Es wurde ein 2-Personen Haushalt mit durchschnittlich  $6,7 \text{ kWh d}^{-1}$  in zwei Szenarien betrachtet. Die PV-Anlage liefert in den beiden Szenarien durchschnittlich  $14,4$  bzw.  $19,2 \text{ kWh d}^{-1}$ . Integral sollte die Energie der PV also zur Deckung des Eigenbedarfs bei Vorhandensein eines Energiespeichers in beiden Szenarien ausreichen.

Ohne das LOHC-System wird in den untersuchten Szenarien ein Autarkiegrad von  $51,8 \%$  (PPV, mittel= $0,6 \text{ kW}$ ) bzw.  $55,9 \%$  (PPV, mittel= $0,8 \text{ kW}$ ) erreicht. Bei Verwendung des LOHC-Systems kann der Autarkiegrad auf  $75$  bis  $80 \%$  erhöht werden. Die fehlenden  $20$  bis  $25 \%$  sind auf die unzureichende Anpassungsgeschwindigkeit der chemischen Freisetzungseinheit an das Lastprofil zurückzuführen. Wird das Volumen zwischen Reaktor und Brennstoffzelle erhöht (was aufgrund der Reinigungseinheiten ohnehin nötig ist) verbessert sich die Dynamik und damit auch der Autarkiegrad.

Bei Vergrößerung des  $\text{H}_2$ -Volumens steigt der Autarkiegrad anfangs sehr stark an, bevor er ab einem gewissen Punkt abflacht (im betrachteten Fall ist dies dann ein linearer Verlauf) und bei  $100 \%$  in eine Sättigung übergeht. Im betrachteten Szenario wird mit einem freien Wasserstoffvolumen von  $0,1 \text{ m}^3$  bereits ein Autarkiegrad von über  $90 \%$  erreicht. Soll das System komplett unabhängig vom Netzstrom sein, müsste das Volumen an durchschnittlichen Tagen  $1,0 \text{ m}^3$  und an Tagen mit geringer Einstrahlung  $1,4 \text{ m}^3$  betragen (Abbildung 9).

<sup>8</sup> André Fikrt, Richard Brehmer, Vito-Oronzo Milella, Karsten Müller, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Nicolas Alt, Eberhard Schlücker, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, „Dynamic Power Supply by Hydrogen Bound to a Liquid Organic Hydrogen Carrier“, *Applied Energy*, **2017**, 194, 1-8

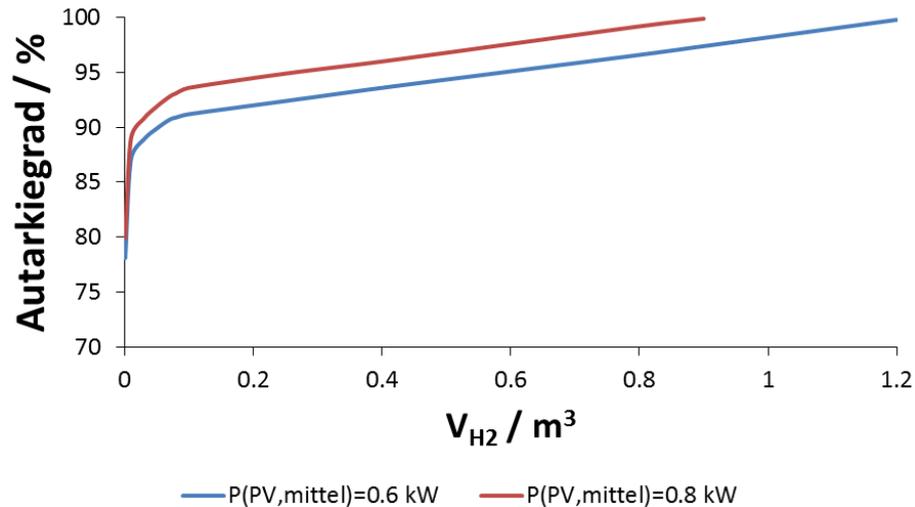


Abbildung 9: Erreichbarer Autarkiegrad des Wohnhauses unter Berücksichtigung der Dynamik der Energiebereitstellung als Funktion des freien Wasserstoffvolumens

In einem dritten Projekt wurde die Zuverlässigkeit von LOHC-basierter Energiespeicherung untersucht (Abbildung 10). Fragestellung war dabei nicht allein die Ausfallwahrscheinlichkeit, sondern auch die Wiederherstellung der Funktionalität nach einer Störung (Resilienz). Es konnte gezeigt werden, dass die Verfügbarkeit (also der Anteil der Zeit über einen längeren Zeitraum zu dem das System statistisch einsatzfähig ist) bei ausreichender Wartung über 97 % liegt. Die Verfügbarkeit der Teilfunktionalitäten (Ein- bzw. Ausspeicherung) liegt sogar über 98 %. Voraussetzung hierfür ist allerdings neben der Einhaltung eines Wartungsplans die schnelle Reaktionsfähigkeit von Reparaturteams. Für Anwendungsszenarien, bei denen das System in Europa beispielsweise zur Energiespeicherung außerhalb von Privathaushalten eingesetzt wird, scheint diese Annahme gerechtfertigt zu sein. In geeigneten Anwendungsszenarien kann die LOHC-Technologie damit eine hohe Zuverlässigkeit bieten. Im Gegensatz zu Batterien führt ein Ausfall in der Regel nur zum einem Teilverlust der Funktionalität. Allerdings ist die Reduktion von Risiken durch die Schaffung von Redundanz schwieriger mit LOHC-Systemen zu realisieren als mit Batterien.

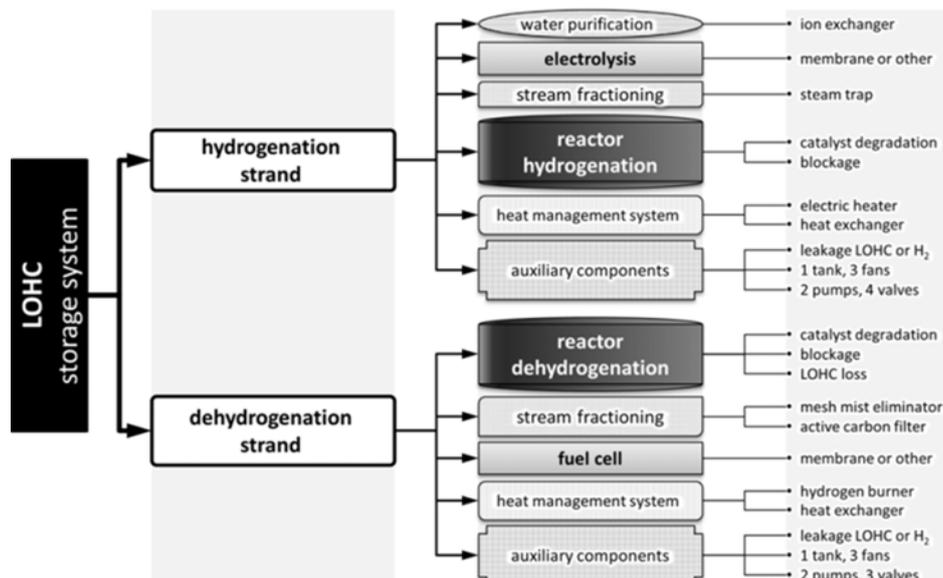


Abbildung 10: Einzelaggregate eines LOHC-Systems und ihre primären Ausfallursachen

## 2 Teilprojekt: Effiziente Wasserstofflogistik

Um die Speichertechnologie um LOHC effizient nachhaltig und ökonomisch in eine sich wandelnde Energieinfrastruktur zu integrieren, bedarf es diesbezüglich genauer Betrachtung einzelner, zentraler Fragen. Neben einer detaillierten Evaluation der Wirtschaftlichkeit wurden in diesem Projektteil verschiedene Konzepte effizienter Kopplung von Technologien für einen möglichst verlustarmen Energiekreislauf untersucht.

### 2.1 Konzept zur direkten Beheizung eines LOHC-Freisetzers mit einem Brenner

In diesem Teilprojekt wurde ein neuartiges Heizkonzept für die Freisetzung des in einem flüssigen organischen Wasserstoffträger gespeicherten Wasserstoffs bestehend aus einem effizienten Verbrennungssystem gekoppelt mit einem Wärmeübertrager entwickelt und realisiert. Der eingesetzte Porenbrenner kann bedarfsgerecht 0,5 kW bis 3,0 kW Leistung liefern und sowohl mit dem gasförmigen Brennstoff Methan als auch mit dem Flüssigbrennstoff Ethanol betrieben werden. Beide Brennstoffe können mit der vorhandenen Tankstellen-Infrastruktur genutzt und CO<sub>2</sub>-neutral hergestellt werden. Die Wasserstofffreisetzung findet im speziell für diese Anwendung entwickelten Wärmeübertrager statt. Dabei wird die erforderliche Energie für die Dehydrierreaktion über eine direkte Beheizung mit dem mehrstofffähigen Porenbrenner eingebracht. Das Projektziel war die Inbetriebnahme eines kombinierten Systems aus Brenner und Wärmeübertrager in der Leistungsklasse 2 kW – 3 kW Wasserstoffenthalpiestrom basierend auf dem unteren Heizwert von Wasserstoff.

Im ersten Projektabschnitt wurde ein kostengünstiger, skalierbarer und voll funktionsfähiger Laboraufbau entwickelt und in Betrieb genommen. Hierfür wurden theoretische und numerische Untersuchungen zur Definition des Konzepts und für die Auslegung des Systems durchgeführt. Aufgrund der für die Anwendung vorteilhaften Eigenschaften eines großen Leistungsmodulationsbereichs, einer variablen Brennergeometrie, einer hohen Flächenlast und geringer Schadstoffemissionen im Betrieb wurde ein Porenbrenner mit vorgeschaltetem Verdampfer für Flüssigbrennstoffe als Wärmequelle für den Dehydrierer ausgewählt. Die flächige, direkte Beheizung der Freisetzungseinheit erzeugt eine homogene Temperaturverteilung in einem Temperaturbereich zwischen 280 °C und 350 °C. Eine durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte, dass der Betrieb der Freisetzungseinheit mit dem Brennstoff Methan am wirtschaftlichsten ist. Einen großen Einfluss auf die Kosten haben außerdem die Haltbarkeit des Katalysators und die Zyklenstabilität des LOHC.

Im zweiten Projektabschnitt erfolgten die Charakterisierung des Systems sowohl hinsichtlich des Wärmeeintrags in den Dehydrierer als auch hinsichtlich des Strömungsverhaltens durch eine statische Simulation des Aufheizvorgangs mit der Software Star-CCM+. Parallel wurden experimentelle Untersuchungen zu den Temperaturfeldern im Abgasstrang des Brenners, im Wärmeübertrager und zum Aufheizverhalten des LOHC durchgeführt. Des Weiteren wurden über flächige Temperaturmessungen mit einer IR-Kamera (FLIR, T540) die Oberflächentemperaturen an der Porenbrenneroberfläche und an den äußeren Wänden des Prototyp-Wärmeübertragers ermittelt. Diese Messdaten dienten als Eingangsparameter für die Simulationen und die Optimierung der geometrischen Gestaltung des Wärmeübertragers. Die in den Versuchen erzielten Ergebnisse zum Aufheizverhalten des Freisetzers und zur Temperaturverteilung im LOHC zeigten die hohe Dynamik des Systems und eine gleichmäßige Wärmeeinbringung in den LOHC durch die direkte Beheizung mit dem Porenbrenner. Die erhaltenen Simulationsdaten stimmen in Näherung gut mit den gemessenen Temperaturen überein und ermöglichten so ein vertieftes Verständnis des Aufheizprozesses, etwaiger Temperaturspitzen und eine effektive Positionierung der Thermoelemente zur Detektion der Temperaturmaxima. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde der Versuchstand umgebaut. Die Steuerung erfolgt nun über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), um einen automatisierten Betrieb mit gleichbleibenden Randbedingungen zu realisieren. Außerdem wurde die Druckregulierung im Dehydrierer überarbeitet, die Möglichkeit eines LOHC-Kreislaufbetriebs hinzugefügt und die automatische Brennerüberwachung optimiert. Ein weiterer Fokus lag auf der Durchführung von Messreihen mit Wasserstofffreisetzung. Dabei wurde der Porenbrenner mit den Brennstoffen Methan und Ethanol betrieben und Messungen zu den jeweiligen Schadstoffemissionen durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen die Mehrstofffähigkeit des Systems sowie die Dynamik einer direkten Beheizung des Dehydrierers sowohl für gasförmige als auch für flüssige Brennstoffe. Dabei stellt sich im Freisetzer ein sehr konstanter Temperaturverlauf mit

einer Abweichung von  $\pm 15$  K zwischen Einlass und Auslass ohne Anzeichen für heiße Stellen („Hot Spots“) ein. Die  $\text{NO}_x$ -Konzentration beim Methan-betriebenen Porenbrenner ist sehr gering und liegt über den Messzeitraum bei ca. 35 ppmV. Dies entspricht bei Berechnung nach EN 267 ca. 54 mg/kWh, was unter dem Grenzwert von 60 mg/kWh (1.BImSchV für Brenner mit einer Nennleistung  $\leq 120$  kW) liegt. Nach der Brennerzündung findet kaum noch CO-Bildung statt. Dies deutet auf eine vollständige Verbrennung des  $\text{CH}_4$  hin, was auch durch den  $\text{H}_2$ -Anteil im Abgas bestätigt wird, welcher den gleichen Verlauf zeigt. Durch die geringeren Verbrennungstemperaturen liegt die  $\text{NO}_x$ -Konzentration beim Ethanolbetrieb mit ca. 6 ppmV deutlich unter der des Methanbetriebs.

Im dritten und letzten Projektabschnitt bildeten die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für die Auslegung und Konstruktion eines leistungsstärkeren Dehydrierers in der im Projekt geforderten Leistungsklasse von 2 kW – 3 kW Wasserstoffenthalpiestrom basierend auf dem unteren Heizwert von Wasserstoff. Dieser wurde in die im letzten Sachbericht vorgestellte Anlage eingebaut und anschließend in Betrieb genommen. In Abbildung 11 ist die Versuchsanlage an ihrem Standort am EnCN im Container des „Speicherhauses“ dargestellt.



Abbildung 11: Laboranlage des LTT im Container des „Speicherhauses“ am EnCN

Die leistungsstärkere Dehydriereinheit wird direkt mit dem im Rahmen des Projekts entwickelten mehrstofffähigen Porenbrenner beheizt und hat ein Innenvolumen von 7,3 l. Der Freisetzer ist mit 1 kg Pt/ $\text{AlO}_x$ -Katalysator (Fa. Hydrogenious) gefüllt, bis zu einem maximalen Druckniveau von 3,5 bar zugelassen und beinhaltet eine integrierte Vorwärmung in der LOHC-Zuführung, damit dieses bereits auf Reaktionstemperatur in das Dehydriervolumen einströmt. In Abbildung 12 ist die beschriebene Dehydriereinheit im eingebauten Zustand ohne Isolierung dargestellt.



Abbildung 12: Dehydriereinheit mit einer Leistung von 2 kW – 3 kW Wasserstoffenthalpiestrom.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des neu entwickelten Freisetzers wurden Messreihen zur Wasserstofffreisetzung und zur Effizienz der Brenner – Wärmeübertrager Kombination durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf der Dynamik des Systems, der Temperaturverteilung im Dehydrierer sowie auf der Maximierung des resultierenden Wasserstoffenthalpiestroms. Für die im Folgenden gezeigten Versuche wurde das LOHC System

Dibenzyltoluol (H0 - DBT) / Perhydro-Dibenzyltoluol (H18 - DBT) mit einem Edukthydriergrad von mindestens 98 % verwendet. Für die Messungen im Methanbetrieb erfolgte die Regelung der erforderlichen Brennerleistung (in einem Bereich von 0,5 kW bis 3,0 kW) über einen PID-Regler entsprechend der vorgegebenen Sollwerttemperatur im Dehydrierer. Das Luft-Brennstoff-Verhältnis  $\lambda$  wird konstant bei 1,2 gehalten. In Abbildung 13 sind vier Versuchspunkte (MP1 – MP4) mit jeweils verändertem Hx - DBT Massenstrom, Temperaturniveau und Druck im Freisetzer dargestellt. Jeder der vier Versuchspunkte wurde nach Einstellung eines Gleichgewichts für mindestens 30 min gefahren. Zunächst erfolgte der Kaltstart des Systems mit den Parametern für den ersten Messpunkt (MP1). Dabei waren der LOHC - Massenstrom 1 kg/h, die mittlere Temperatur im Dehydrierer 280 °C und das Druckniveau 2,75 bar (absolut). Das Temperaturniveau wird ca. 40 min nach dem Kaltstart erreicht und gleichzeitig setzt auch die Wasserstofffreisetzung ein. In diesem Messpunkt werden lediglich 25 % des im LOHC gespeicherten Wasserstoffs freigesetzt und der Wasserstoffenthalpiestrom beträgt ca. 0,6 kW bei einer Brennerleistung von ca. 0,9 kW. Im zweiten Messpunkt (MP2) wurde das Temperaturniveau konstant gehalten, aber der LOHC-Massenstrom auf 1,8 kg/h erhöht und das Druckniveau auf 1,0 bar (absolut) abgesenkt. Dies führt zu einem gesteigerten Wasserstoffenthalpiestrom von ca. 1,2 kW bei einer Brennerleistung von ca. 1,4 kW. Dabei werden nun ca. 35 % des gespeicherten Wasserstoffs freigesetzt. Im dritten Messpunkt (MP3) wird das Druckniveau konstant gehalten, der LOHC-Massenstrom auf 1,0 kg/h abgesenkt und die mittlere Temperatur auf 320 °C erhöht. Dies führt zu einer weiteren Steigerung des Wasserstoffenthalpiestroms auf ca. 1,5 kW bei einer Brennerleistung von ebenfalls ca. 1,5 kW. Nun werden ca. 70 % des gespeicherten Wasserstoffs freigesetzt. Im letzten Messpunkt (MP4) wurde das Druckniveau auf 2,75 bar (absolut) und der LOHC-Massenstrom auf 1,8 kg/h erhöht. Dies führt wiederum zu einem gesteigerten Wasserstoffenthalpiestrom von ca. 2,1 kW bei einer Brennerleistung von ca. 1,85 kW. Nun werden ca. 55 % des gespeicherten Wasserstoffs freigesetzt.

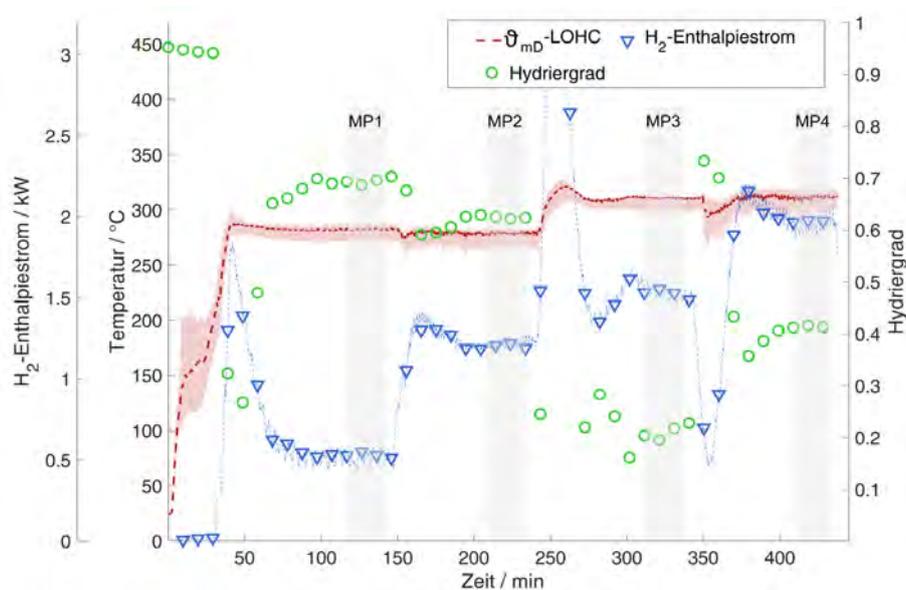


Abbildung 13: Wasserstoffenthalpiestrom, Hydriergrad und LOHC-Temperatur mit dem Methan - betriebenen Porenbrenner für eine variable Brennerleistung von 0,5 kW - 3,0 kW, eine mittlere Temperatur von 280 °C (MP1 & MP2) oder 320 °C (MP3 & MP4), einen veränderlichen LOHC-Massenstrom von 1,0 kg/h (MP1 & MP3) und 1,8 kg/h (MP2 & MP4) und ein Druckniveau im Dehydrierer von 1 bar (absolut, MP2 & MP3) und 2,75 bar (absolut, MP1 & MP4). Der schattierte Bereich der Temperatur stellt die Temperaturunterschiede im LOHC innerhalb der Reaktionszone dar.

Anhand der Messdaten erkennt man sehr gut, wie dynamisch sich das System verhält. Die Abgastemperatur des Methanbetriebenen Porenbrenners beträgt maximal ca. 850 °C vor und maximal ca. 180 °C nach der Dehydriereinheit, was die hervorragende Abgaswärmenutzung zeigt. Die resultierende Temperaturverteilung in der Reaktionszone ist mit einer Abweichung von  $\pm 15$  K (hellroter Bereich in Abbildung 13) von der Solltemperatur in der Reaktionszone sehr gleichmäßig. Die Anpassung der einzelnen Parameter führt zu einem leichten Über- bzw. Unterschwingen der Temperatur und zu einem starken Ausschlag des Wasserstoffenthalpiestroms, was auf die kurzzeitig stark veränderten Reaktionsbedingungen zurückzuführen ist. Generell zeigt sich wie erwartet mit zunehmendem Temperaturniveau eine stark zunehmende Wasserstofffreisetzung. Weiterhin hat der zugeführte LOHC-Massenstrom einen deutlichen Einfluss auf die Wasserstofffreisetzung und insbesondere auf den Hydriergrad, was auf die unterschiedlichen Verweilzeiten

zurückzuführen ist. Der Druck hat in den Untersuchungen einen relativ geringen Einfluss auf den Wasserstoffstrom, jedoch führt ein höherer Druck tendenziell zu geringeren Freisetzungseinstellungen. Die Ergebnisse unterstreichen die hohe Systemdynamik bei der direkten Beheizung des Dehydrierers mit einem Brenner.

Mit den gezeigten Ergebnissen wurden die Projektziele vollumfänglich erreicht und ein leistungsdichtes, dynamisches und effizientes System mit einem Wasserstoffenthalpiestrom von 2 kW aufgebaut. Mit der vorhandenen Freisetzungseinheit kann über eine Anpassung der geometrischen Abmessungen und der Katalysatormenge ein „Scale - up“ bis zu einer Leistungsklasse von 10 kW erreicht werden. Über eine anschließende Parallelschaltung von 10 kW Einheiten kann eine Skalierung auf die gewünschte Zielgröße erfolgen.

Über den aktuellen Stand des Projekts wurde 2021 auf dem European Combustion Meeting in Neapel und auf dem Flammentag in Hannover berichtet (siehe Abschnitt 5). Abschließend befindet sich noch ein wissenschaftlicher Beitrag zur Veröffentlichung in einem Fachjournal in der Vorbereitung.

Die Arbeiten und Ergebnisse dieses Projekts bildeten die Grundlage für zwei (Teil-)Projekte des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik im Rahmen des Projekts „Emissionsfreier und stark emissionsreduzierter Bahnverkehr auf nicht-elektrifizierten Strecken“ mit dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg.

## 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. Es wurde 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, kalzinieren und mit dem Platinpräkursor imprägniert. Durch die anschließende Reduktion wurde das aktive Edelmetall gebildet, sodass der Pt/ $Al_2O_3$ -Katalysator für die Dehydrierung von  $H_{18}$ -DBT verwendet werden konnte. Diverse Parameter der Präparationsmethode, wie z.B. Dicke der Trägerschicht, Platinbeladung, Präkursorart 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 14). 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 (höhsiedende Nebenprodukte) im LOHC bei einem Dehydriergrad von 80 %.

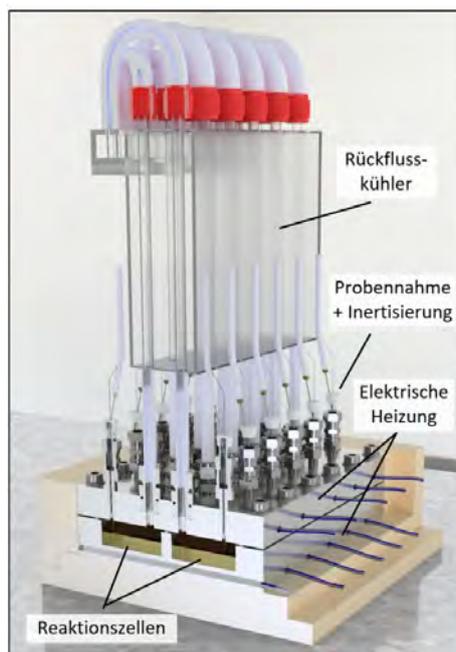


Abbildung 14: CAD-Modell des Screening-Reaktors mit Halbschnitt durch zwei Reaktionszellen.

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 15).

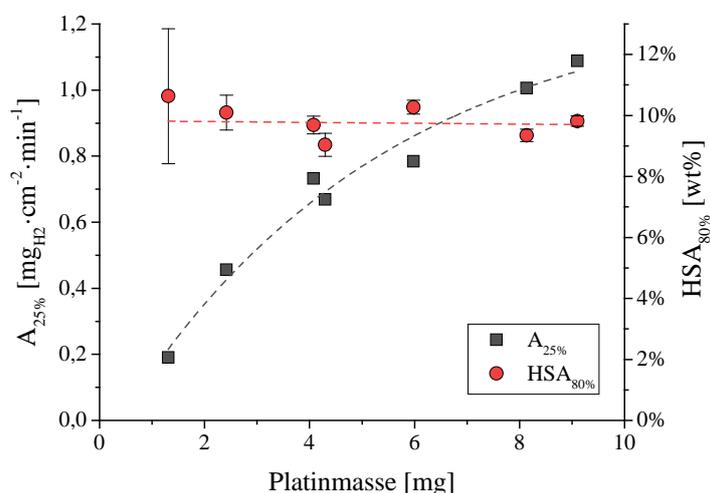


Abbildung 15: Aktivität und Hochsiederbildung aufgetragen über die Platinmasse.  $16,6 \text{ cm}^2$  beschichtete Metallfläche,  $m_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 68 - 446 \text{ mg}$ ,  $B = 1 - 2,6 \text{ wt}\%_{\text{Pt}}$ ,  $PC = \text{Hexachloroplatinsäure}$ .

Es ist bereits bekannt, dass die Nebenproduktbildung durch eine Nachbehandlung mit schwefelhaltigen Komponenten stark minimiert werden kann<sup>9</sup>. Durch die Verwendung von einer sauren Platinsulfid-Lösung als Präkursor während der

<sup>9</sup> 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.

Katalysatorpräparation wird der Schwefel direkt bei der Imprägnierung mit aufgebracht. Dadurch konnten wesentlich geringere HSA<sub>80%</sub>-Werte von unter 3,6 wt% erzielt werden. Gleichzeitig wurden durch höhere Platinkonzentrationen Aktivitäten von 2,4 mg<sub>H<sub>2</sub></sub>·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup> bei Produktivitäten von 1,35 g<sub>H<sub>2</sub></sub>·g<sub>Pt</sub><sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> erzielt (siehe Abbildung 16).

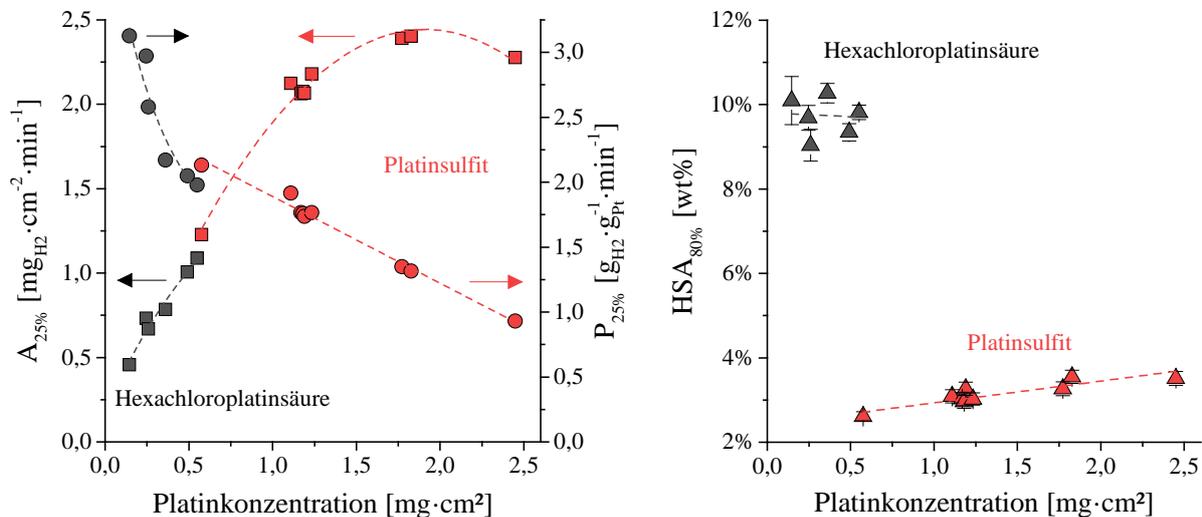


Abbildung 16: Vergleich der Aktivitäten (Quadrate), Produktivitäten (Kreise) und der Hochsiederbildung (Dreiecke) von Katalysatoren aus Hexachloroplatinsäure (schwarz) und Platinsulfit (rot) im Screening-Reaktor.

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.

### 2.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Die enge Kooperation zwischen Ingenieuren und Wirtschaftswissenschaftlern im FSP 2 ermöglicht eine umfassende und präzise Analyse der Wirtschaftlichkeit der LOHC-Technologie und vergleichbarer Alternativen wie Fischer-Tropsch Diesel, Ammoniak, Methanol oder flüssiger Wasserstoff. Gleichzeitig erlauben die Arbeiten eine integrierte Betrachtung von Mobilitätskonzepten und Strommärkten. Eine enge Zusammenarbeit besteht diesbezüglich mit dem EnCN-Projekt „Energemarktdesign“ (EMD).

Ziel ist der Vergleich der Produktionskosten von Wasserstoff und seinen Derivaten im In- und Ausland. Dabei kommt der produzierten Wasserstoffmenge eine herausragende Bedeutung zu. Aufgrund des hohen Energiebedarfs der Wasserstoffproduktion und Weiterverarbeitung zu flüssigen und gasförmigen Energieträgern, kann die Produktion die Preisbildung am Strommarkt beeinflussen und damit beispielsweise Investitionen in neue Stromerzeugungskapazitäten katalysieren oder zu höheren Preisen führen. Durch die zum Teil sehr flexibel steuerbare Stromnachfrage der Anlagen können sich durch eine geschickte Standortwahl jedoch auch positive Effekte auf das Engpassmanagement oder den Netzausbau ergeben. Die positiven wie negativen Effekte der heimischen Produktion gilt es zu quantifizieren und dem Import von Wasserstoff und verschiedener Derivate aus dem Ausland gegenüberzustellen.

Eine grundlegende Voraussetzung für eine solche Evaluation ist eine möglichst genaue Nachfrage nach Wasserstoff und seinen Derivaten in Deutschland. Die Nachfrage nach CO<sub>2</sub> reduziertem Wasserstoff und seinen Derivaten wird Deutschlandweit in Zukunft erheblich steigen. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch unklar, in welchem Ausmaß und auf welcher Zeitschiene die benötigten Mengen zunehmen werden. Dem Industriesektor kommt bei dem Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft eine besonders entscheidende Rolle zu. Daher wurden auf Grundlage von gemeldeten CO<sub>2</sub>-Emissionen Abschätzungen für verschiedene Industrien über den zukünftigen Wasserstoffverbrauch gemacht (siehe Abbildung 17). Der Wasserstoffbedarf wird demnach vor allem in Bereichen der chemischen Industrie und bei der grünen Stahlherstellung stark ansteigen und könnte sich zukünftig alleine in den beiden genannten Industrien auf über 300 TWh pro Jahr belaufen.

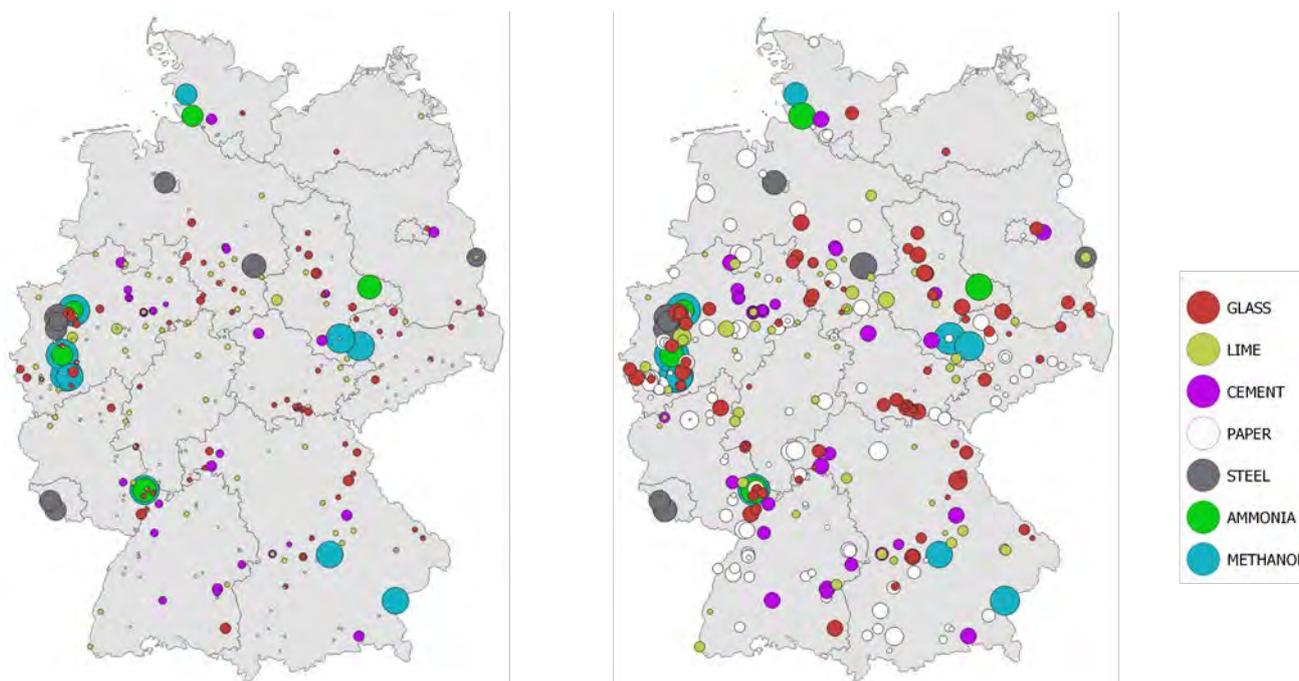


Abbildung 17: Allokation des zukünftigen Wasserstoffverbrauchs der deutschen Industrie in einem klimaneutralen Energiesystem.  
Links: Minimaler Wasserstoffbedarf, Rechts: Maximaler Wasserstoffbedarf.

Aufgrund der zu erwartenden höheren Wasserstoffgestehungskosten in Deutschland, gilt es als wahrscheinlich, dass sich die Wertschöpfungsketten verschiedener Produkte wie Methanol und seine Folgeprodukte, Düngemittel, Glaserzeugnisse oder auch Stahl stark verändern werden. Bei sämtlichen genannten Produkten werden die Wasserstoffkosten zukünftig einen großen Anteil an den endgültigen Produktionskosten ausmachen, weshalb es als wahrscheinlich gelten kann, dass gewisse Produktionsschritte in Länder verlagert werden, in denen besonders günstige Gestehungskoten für CO<sub>2</sub>-reduzierten Wasserstoff erreicht werden können. Diese Zusammenhänge gilt es weiter zu verstehen und Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger abzuleiten.

Als Vorarbeiten dieses Projekts sind die Berechnungen von Mobilitätskosten für e-Fuels produziert an Standorten mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien zu sehen. Sehr wind- oder sonnenreiche Standorte zeichnen sich auf Grund der widrigen Witterungsbedingungen häufig durch eine relativ geringe Bevölkerungsdichte und dadurch bedingten unzureichender Infrastruktur aus. Sämtliche Betriebsmittel, wie Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, thermische und elektrisch Energie müssen daher vor Ort gewonnen werden. Die Prozesskette von der Erzeugung der Betriebsmittel über die Synthese der Kraftstoffe, den Transport nach Deutschland und Weiterverteilung an die Tankstellen bis hin zur energetischen Verwertung im Auto wurde modelliert. Dafür mussten notwendige Systemkonfigurationen und relevante technische und wirtschaftliche Parameter für das Modelljahr 2035 identifiziert werden. Die Wahl des Jahres 2035 eröffnet zum einen die Möglichkeit der Integration des e-Fuel Modells in bereits bestehende Modellumgebungen aus dem Bereich des Energiemarktdesigns, welche auf Grund der guten Datenlage mit Parameterwerten für 2035 kalibriert sind. Zum andern kann zu diesem Zeitpunkt von einem hohen Reifegrad der verwendeten Technologien ausgegangen werden.

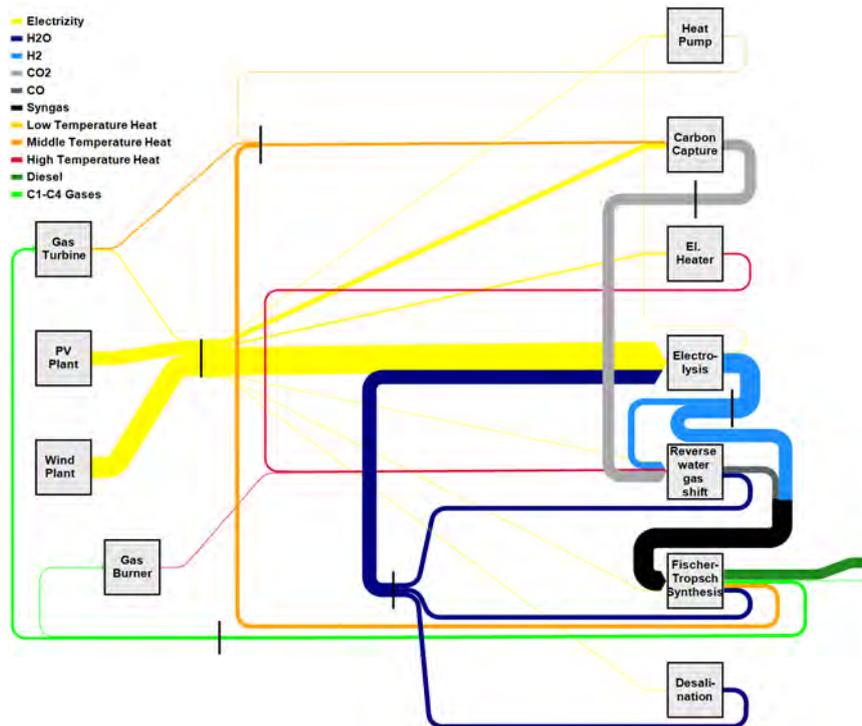


Abbildung 18: Sankey-Diagramm der Fischer-Tropsch-Dieselerstellung am Golf von Akaba in Ägypten.

Die Auswertungen des mathematischen Modells ergeben endogen die kostenminimalen Kapazitäten der beteiligten Komponenten (bspw. PV- und Windkraftanlagen, Elektrolyseure, Syntheseanlagen, Speichertanks). Daraus können sowohl Aussagen über das Design einer systemkostenminimalen Prozesskette als auch Auslastungsgrade und notwendiges dynamisches Verhalten der Komponenten abgeleitet werden. Die Prozesskette kann beispielhaft für die Dieselerzeugung in Ägypten (siehe Abbildung 18) nachvollzogen werden.

Neben Aussagen über die optimierte Prozesskette können überdies die Mobilitätskosten der verschiedenen e-Fuels an unterschiedlichen Produktionsstandorten verglichen werden. Dabei zeigt sich in Abbildung 19 exemplarisch für LOHC, dass Standorte mit Zugang zu stetigen erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft oder Geothermie zu günstigeren Mobilitätskosten führen, als solche mit fluktuierenden Quellen wie PV oder Wind. Eine ausführliche Diskussion aller betrachteter Technologien und Standorte findet sich in Runge et al. (2020-SSRN).

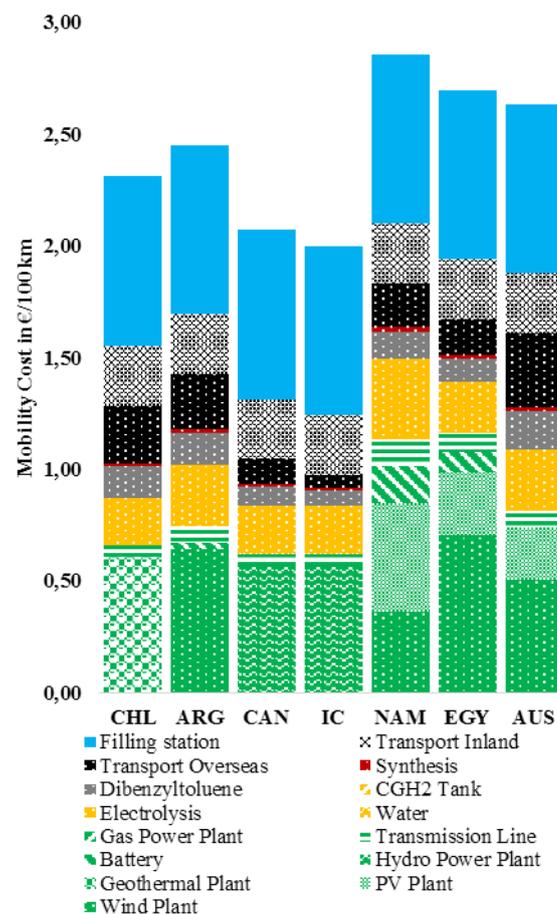


Abbildung 19: Vergleich der Mobilitätskosten eines Wasserstoffautos (Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle via LOHC) bei der Produktion des Kraftstoffs im Ausland (Chile, Argentinien, Kanada, Island, Namibia, Ägypten, Australien).

In Runge et al. (2019-ApEn) wurde die Produktion, die Verteilung und die Speicherung verschiedener e-Fuels in Deutschland untersucht. Dabei wurde der kostenoptimale Aufbau und Betrieb aller relevanter Anlagen bestimmt, der nötig ist um einen Teil (ca. 5%) der deutschen PKW-Flotte mit e-Fuels zu versorgen. Unter Betrachtung verschiedener Sensitivitäten bezüglich der Annahmen zu den verwendeten Parametern im zukünftigen Energiesystem konnte gezeigt werden, dass Brennstoffzellen-Fahrzeuge, deren Wasserstoff mittels LOHC gespeichert und transportiert wurde, im Vergleich zu synthetische Kraftstoffe die geringsten Mobilitätskosten aufweisen. Zu den Sensitivitäten gehören dabei die Variation der CAPEX verschiedener Anlagen, verschiedene Annahmen bzgl. der zu zahlenden Steuern und Abgaben für Strom und die Betrachtung verschiedener Preisregimes am deutschen Strommarkt. Dabei wurde das Einheitspreissystem, wie es aktuell in den meisten europäischen Ländern implementiert ist, mit einem Nodalpreissystem verglichen, welches in der Theorie zu optimalen Preisanreizen für Investition und Betrieb der Anlagen führt und z.B. in den USA zum Einsatz kommt. Die günstigsten Mobilitätskosten konnten dabei unter einem Nodalpreissystem erreicht werden, wenn die e-Fuel Produktion in Regionen mit vergleichsweise niedrigen Nodalpreisen angesiedelt war. Diese Regionen würden wegen der Übertragungsnetzengpässe insbesondere auf den Nord-Süd-Verbindungen und der hohen Verfügbarkeit von konventionellen und erneuerbaren Stromerzeugern insbesondere im Norden Deutschlands liegen.

Da der für die Produktion der e-Fuels benötigte Strom in den bisherigen Projekten (Runge et al., 2019;2020) nur einen sehr geringen Anteil der gesamtdeutschen Nachfrage ausmacht, wurden bisher exogene Preisvektoren angenommen, die im Teilprojekt Energiemarktdesign (EMD) mittels des an der FAU und dem EnCN entwickelten „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Modells (siehe u.a. Grimm et al., 2016;2021) für das Jahr 2035 berechnet wurden. Da für das Erreichen von Netto-Null-Emissionen bis 2045 (siehe Klimaschutzgesetz (KSG), §3) auch die Nutzung von (grünem) Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen eine wichtige Rolle spielen wird, siehe z.B. die nationale Wasserstoffstrategie, stellt sich die Frage, ob diese Kraftstoffe komplett aus Vorzugsregionen importiert werden oder zum Teil auch wirtschaftlich in Deutschland produziert werden können. So sieht die Nationale Wasserstoffstrategie einen Aufbau von

5 GW Elektrolysekapazität bis 2030 und von mindestens 10 GW bis 2040 vor. Bei der daraus resultierenden Stromnachfrage ist eine reine Preisnehmersicht für den Strommarkt nicht mehr sinnvoll, da in dieser Größenordnung Auswirkungen des Elektrolysebetriebs auf den Strompreis und damit die anderen Strommarkt-Akteure zu erwarten sind. Diese Interaktion zwischen nationaler Wasserstoff- bzw. synFuel-Produktion und dem Strommarkt wird in einem weiteren Projekt seit Ende 2020 analysiert. Dabei wird die Auswirkung auf Spotmarkt-Preise aber auch auf Investitionen von privaten und regulierten Marktteilnehmern unter verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen untersucht. Eine zentrale Frage ist dabei, unter welchen Rahmenbedingungen eine teilweise Produktion von Wasserstoff und synFuels auch in Deutschland wirtschaftlich sein kann. Dazu wurde das in Abbildung 20 illustrierte Modell entwickelt, welches die Modellierungsansätze aus den Teilprojekten Speicher B und Energiemarktdesign verknüpft.



Abbildung 20: Illustration der Modellierung eines Nationalen Wasserstoff- und synFuel-Marktes mit Import und heimischer Produktion.

## 2.4 Wärmeübertragungskompressor für die LOHC-Vorwärmung

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHCs) sind chemische Verbindungen, die Wasserstoff speichern, indem sie ihn während des Hydrierungsprozesses chemisch binden. Um den Hydrierungsprozess durchzuführen, wird Wärme bei relativ hohen Temperaturen und hohen Drücken benötigt. Die Freisetzung von Wasserstoff während des Dehydrierungsprozesses erfordert mehr Energie in Form von Wärme bei noch höheren Temperaturen. Bei der Verdichtung von Wasserstoffgas auf sehr hohe Drücke bis zu 1000 bar in Wasserstoffkompressoren werden sehr hohe Austrittstemperaturen erreicht, da der Verdichtungsprozess nahezu adiabatisch abläuft. Die bei der Verdichtung entstehende Wärme wird in den meisten Fällen an die Umgebung abgeführt. Die aktuelle Forschung stellt einen Ansatz zur Nutzung oder Rückgewinnung dieser Wärme dar. Die im Rahmen dieses Projektes verwendeten LOHCs sind im flüssigen Zustand bis zu 300 °C stabil und es besteht kein Risiko der Dampfbildung. Daher eignen sie sich hervorragend für die direkte Kühlung in Wasserstoffkompressoren, wodurch der thermische Wirkungsgrad und die volumetrische Effizienz des Kompressors verbessert werden.

Für Kolbenkompressoren wäre es ein großer Vorteil diese Lösung darin zu realisieren, denn sie sind die bevorzugten Maschinen für sehr hohe Drücke. Außerdem erfolgt die Beladung von Fahrzeugen an Wasserstofftankstellen mit einem Druck von 700 bar. Da mit einer Steigerung dieser Druckstufe zu rechnen ist, ist unser Ziel die Verdichtung von Wasserstoff auf max. 1000 bar. An unserem Lehrstuhl wurde ein Prototyp dieses Kompressorsystems gebaut (siehe Abbildung 21). Aufgrund der geringeren Komplexität und Robustheit dieser Maschine, im Vergleich zu

Schraubenmaschinen, können die Wärmeübertragungsphänomene damit bis 300 °C untersucht werden. Das vertikale Design des Kompressors sorgt dafür, dass das LOHC+ immer nach unten an der Verdichter-Innenwand strömt, sodass ein Fall-Film entsteht, der den direkten Kontakt des Wasserstoffs mit dem Metallgehäuse verhindert. Auf diese Weise wird die Wärme von Wasserstoff auf das LOHC+ übertragen und der Werkstoff etwas geschützt. Nach der Verdichtung wird das LOHC+ gemeinsam mit dem Wasserstoff über ein Druckventil ausgestoßen, wodurch sich eine noch bessere Mischung der beiden Strömungen einstellt und die Wärme perfekt übertragen wird.



Abbildung 21: Eine neue Art von Kolben-Wasserstoff Kompressor Prototyp und die gesamte Anlage

Diese Konstruktion ermöglicht es, die Kompressionswärme aufzunehmen und später zur Dehydrierung von LOHC+ oder für andere Zwecke zu nutzen. Der Kolbenarbeitsraum enthält oben eine umlaufende Nut, über die kaltes LOHC+ zugeführt und der Fallfilm erzeugt wird. Über dem Kolben ist immer eine LOHC-Schicht die als Wasserstoffdichtung dient. Bei der Bewegung des Kolbens nach oben sammelt der Kolben das LOHC auf und fördert es schließlich mit dem Wasserstoff durch das Druckventil aus. Durch diese LOHC-Schicht wird auch der Schadraum auf nahezu Null gebracht, was einen weiteren massiven Effizienzgewinn darstellt. Der Kompressor wird mit einem Hydraulikaggregat angetrieben und kann damit mit variabler Geschwindigkeit von 10 bis 40 mm/s sowie einen einstellbaren Hub von 50 bis 399,5 mm betrieben werden. Damit kann die beste Kolbengeschwindigkeit, für die höchste Wärmeübertragung zwischen LOHC+ und Wasserstoffgas, gewählt werden. Der ausgelegte Prototyp ermöglicht aber leider keine hohen Kolbengeschwindigkeiten. Deshalb wurde ein kleiner, einfacher Kolbenkompressor aufgebaut, um die Flüssigkeitsschicht in der Kompressionskammer zu optimieren, die eine entscheidende Rolle bei der Minimierung des Totraums am Ende des Kompressors spielt (siehe Abbildung 22). Verschiedene, für diesen Kolbenkompressor typische Betriebsgeschwindigkeiten werden verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flüssigkeitsschicht bis zu einer maximalen Kolbengeschwindigkeit von 0,14 m/s stabil ist und laminar bzw. transient fließt.

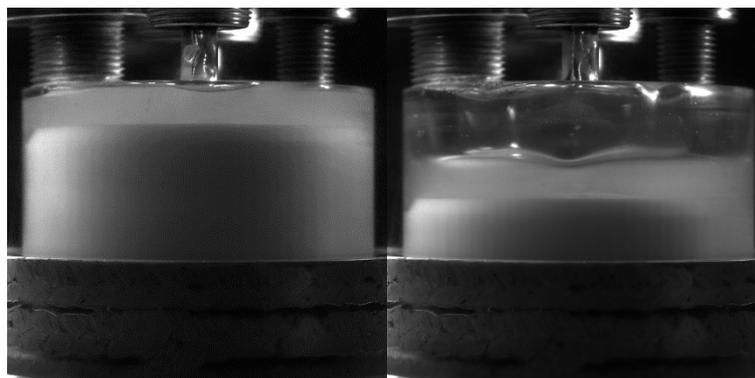


Abbildung 22: Kolben mit der LOHC+ Schicht am unteren (links) und oberen (rechts) Totpunkt

Um die Austrittstemperatur des komprimierten Gases im Kompressor für verschiedene Kolbengeschwindigkeiten zu ermitteln, wurde die Fragestellung zunächst anhand eines CFD-Modells untersucht (Abbildung 23). 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 polytropen Kompressionsprozess im Simulationsmodell ist die Temperatur der Kompressorwände während des Kompressionsprozesses konstant gehalten worden. Für eine Beispiel-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 23 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.

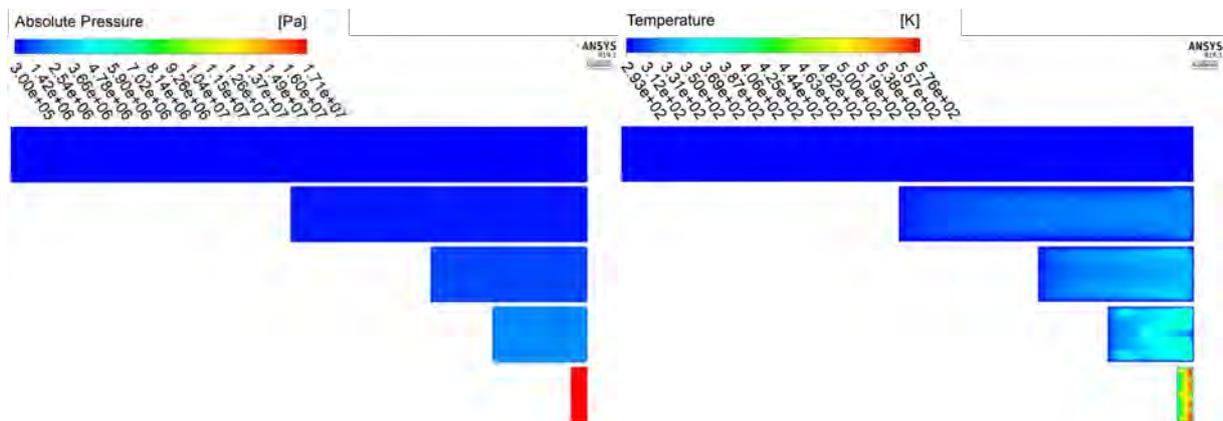


Abbildung 23: Druckanstieg und Temperaturanstieg während der Kompression

In diesem Kompressor wird ein maximaler Druck von 960 bar erreicht, allerdings bisher nur mit Heliumgas. Es wurden auch viele Tests mit Stickstoffgas für eine Vielzahl von Parametern durchgeführt. Danach wurde auch Wasserstoffgas für verschiedene Verdichtungsgeschwindigkeiten und verschiedene Drücke verdichtet. Ein Versuch für die minimale Verdichtergeschwindigkeit von 10 mm/s und für einen maximalen Förderdruck von 448 bar ist in der Abbildung 24 dargestellt. Die Temperatur des komprimierten Wasserstoffs beträgt selbst bei diesem hohen Druck weniger als 80 °C. Dies ist auf die sehr langsame Kompressionsgeschwindigkeit und auch auf den Effekt des fallenden Films zurückzuführen. Der Hub wurde so eingestellt, dass sich der Kolben von 50 bis 390 mm bewegt, wobei zusätzlich 9 bis 10 mm LOHC+ Schicht über dem Kolben gebildet wurde, um den komprimierten Wasserstoff zu verdrängen.

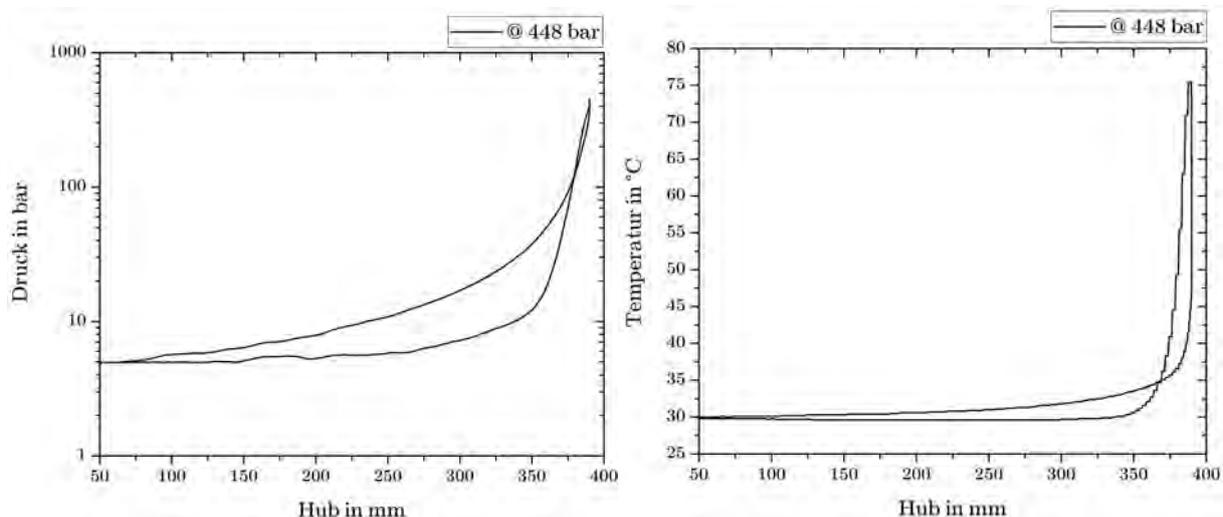


Abbildung 24: Druck und Temperatur bei der Verdichtung von Wasserstoffgas

Es gibt zahlreiche weitere Versuche, bei denen Wasserstoffgas mit maximaler Kolbengeschwindigkeit verdichtet wurde, um den maximalen Druck und die maximale Temperatur zu bestimmen. Aus diesen Versuchen kann man schließen, dass LOHC in diesem Kompressor viele Vorteile bringt. Dieses Konzept zeigt, dass hohe Drücke auf effizientere und sicherere Weise erreicht werden können, was für Wasserstofftankstellen oder andere Anwendungen von Vorteil wäre.

Schraubenkompressoren sind Maschinen, die Gase auf niedrige bis mittlere Drücke aber mit sehr hohem Volumenstrom verdichten können. Obwohl die erreichbaren Drücke viel niedriger sind als bei Kolbenkompressoren, wird während der Kompression viel Wärme erzeugt. Um die Effizienz dieser Maschinen zu erhöhen, ist auch eine Kühlung erforderlich. Daher werden diese Maschinen, außer in Trockenlaufbauweise, auch in Nassbauweise (ölgeflutet Kompressoren) gebaut. Konstruktionsbedingt wird das Öl auch zur Schmierung der Rotoren der Kompressoren verwendet. In diesem Teilprojekt wird flüssiger organischer Wasserstoffträger LOHC bzw. LOHC+ (mit Wasserstoff beladen) zur Kühlung und Schmierung dieser Maschine verwendet. Es wurde eine Anlage aufgebaut (siehe Abbildung 25), um die Kühl- und Schmierwirkung zu untersuchen und gleichzeitig die Energiemenge zu berechnen, die zum Erwärmen des LOHC+ verwendet werden kann, um bei der späteren Dehydrierung im Dehydrier-Reaktor Energie zu sparen.

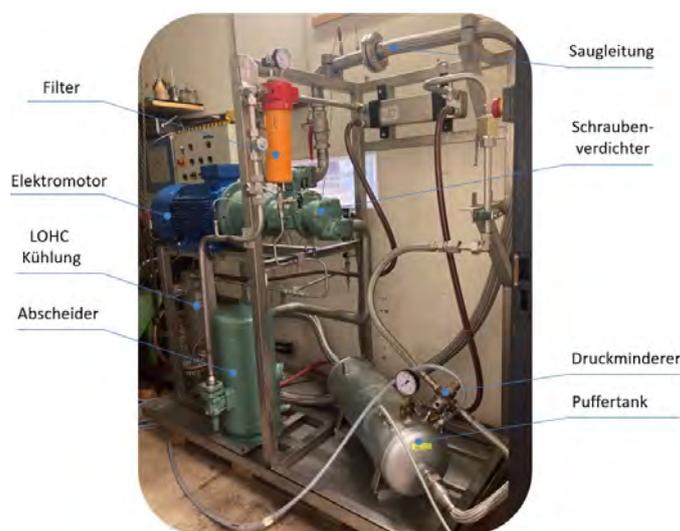


Abbildung 25: Schraubenverdichter Anlage

Die Idee ist es, Wasserstoff in diesen Maschinen zusammen mit LOHC+ zu verdichten, wobei der komprimierte Wasserstoff in einem Drucktank gespeichert wird und das warme LOHC+ zirkuliert, um die Wärme zu transportieren. Je nach Anlagendesign würde das warme LOHC+ direkt in den Dehydrierungsprozess fließen oder es könnte über einen Wärmetauscher gekoppelt werden, um das LOHC+ im sekundären offenen Kreislauf des Dehydrierungsprozesses zu erwärmen. Der im Drucktank gespeicherte Wasserstoff könnte von einem Verbraucher für andere Prozesse verwendet werden oder in einen nachgeschalteten Hochdruck-Kolbenkompressor gegeben werden, um höhere Drücke zu erreichen. Da es auf dem Markt keine Schraubenverdichter für Wasserstoff gibt, wurde ein ölgefluteter Verdichter (Bitzer-Schraubenverdichter Typ OS. 53) für Wärmepumpen verwendet. Anstelle von Wasserstoff wird in dieser Maschine Stickstoff als kompressibles Medium verwendet, um die Kühlung mit LOHC+ zu untersuchen.

Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Parametern, wie Ansaugdruck, Auslassdruck, LOHC+ Volumenstrom, Kühlwasservolumenstrom und die verschiedenen Drehzahlen des Verdichters durchgeführt. Es werden in der Abbildung 26 die Messungen eines Testlaufs gezeigt.

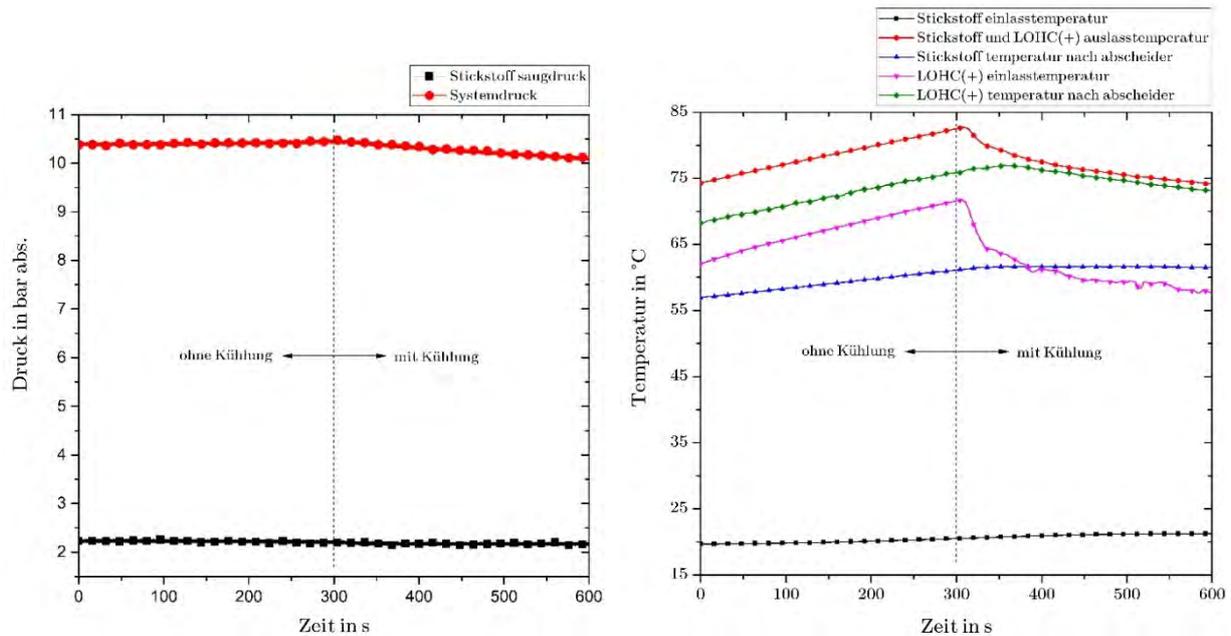


Abbildung 26: Links, Druckverlauf ohne und mit Kühlung, rechts, Temperatur Verlauf des Stickstoffs und LOHC+ ohne und mit Kühlung während Verdichtung

Dieser Schraubenkompressor ist für einen maximalen Druck von 28 bar und eine Temperatur von weniger als 100 °C ausgelegt. Je nach Lager- und Dichtungsmaterial kann er bei höheren Temperaturen arbeiten. Daher wurden in diesem speziellen Fall Tests für eine maximale Temperatur von 85 °C und für einen Systemdruck von 10,4 bar absolut durchgeführt, ausgehend von einem Saugdruck von 2,3 bar absolut. Die Drehzahl des Kompressors betrug 1008 U/min, die mit einer Lichtschranke gemessen wurde. Die Messungen wurden in geschlossenem System durchgeführt. Es zirkulierte also Stickstoff und LOHC+. Die Kühlung erfolgte des Kreislaufes erfolgte mit Wasser. Aus Abbildung 26 ist ersichtlich, dass zu Beginn der Verdichtung das Kühlwasser abgestellt war. Betrachtet man das Zeitintervall von 0 bis 300 Sekunden, so steigt die Temperatur von Stickstoff und LOHC+ am Auslass weiter auf etwa 84 °C an.

In diesem Fall wurden 9 l/min LOHC+ in den Kompressor eingespritzt. Für das Zeitintervall von 300 bis 600 Sekunden fließt Kühlwasser in den LOHC+-Wärmetauscher mit einem Volumenstrom von 5 l/min. Um die Austrittstemperatur im Kompressor weiter zu senken, sollte der Kühlwasservolumenstrom erhöht werden. Es wird jedoch empfohlen, die Eintrittstemperatur des LOHC nicht unter 30 °C fallen zu lassen, da das LOHC unter dieser Temperatur sehr zähflüssig ist. Aus diesen Versuchen lässt sich schließen, dass eine beträchtliche Menge an thermischer Wärme bereitgestellt und genutzt werden kann, anstatt sie nutzlos in die Atmosphäre zu entlassen.

Da in dieser Untersuchung mehr die Kühlwirkung des Kompressors bzw. der Vorwärmung von LOHC+ untersucht wird, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob LOHC+ auch ein gutes Schmiermittel für lange Betriebsstunden ist.

### 3 Teilprojekt: Effiziente Wasserstoffnutzung

Die Nutzung von regenerativ erzeugtem und in LOHC gespeichertem Wasserstoff zusammen mit Erdgas für die Verstromung in Blockheizkraftwerken wurde in diesem Teilprojekt intensiv untersucht. Damit wurde das Minderungspotenzial von CO<sub>2</sub> Emissionen in Blockheizkraftwerken nachgewiesen.

#### 3.1 BHKW im Wasserstoff-Erdgas-Mischbetrieb

Bei Bedarf erfolgt die Dehydrierung des LOHC in Form einer endothermen katalytischen Reaktion. Die für die Freisetzung des Wasserstoffs benötigte Wärme ist dabei vom Trägermaterial abhängig; nachfolgende Ergebnisse beziehen sich auf Dibenzyltoluol bzw. Perhydrodibenzyltoluol. Zur Dehydrierung wird eine Wärme von 65 kJ je Mol Wasserstoff ( $\pm 27\%$  des unteren Heizwertes von Wasserstoff) auf einem Temperaturniveau von rund 300 °C benötigt. Bei einer Verstromung des Wasserstoffs in Blockheizkraftwerken mit Hubkolbenmotoren kann die Abgasenthalpie zum Lösen des Wasserstoffs vom Trägermolekül genutzt werden. Allerdings ist bei hocheffizienten Wasserstoffmotoren die verfügbare Abgasenthalpie nicht ausreichend, um den benötigten Wasserstoffstrom bereitzustellen, so dass ein Zielkonflikt zwischen wirkungsgradoptimalem Betrieb und der Bereitstellung hinreichender Abgas-Energien für die Dehydrierung entsteht. Ein Mischbetrieb verschiedener Energieträger, insbesondere von regenerativ erzeugtem Wasserstoff mit Erdgas bzw. Methan kann diesen Zielkonflikt lösen. Untersucht werden die Auswirkungen der Zusammensetzung des Brenngases im Wasserstoff-Erdgas-Mischbetrieb auf Energieeffizienz, CO<sub>2</sub>-Emission und Schadstoffemissionen, wobei die notwendige Energie für die Dehydrierung vollständig aus der Abgasenthalpie gedeckt wird.

Zunächst wird die Grundvermessung mit reinem Wasserstoff durchgeführt. Der Wasserstoff wird dabei mittels eines eigens entwickelten Niederdruck Direktinjektors direkt in den Brennraum eingeblasen. Bei den Versuchen mit reinem Wasserstoff werden zwei Extremfälle betrachtet: Zum einem wird der Motor wirkungsgradoptimal betrieben, zum anderen wird der Motor so betrieben, dass die Abgasenthalpie maximal ist. Im wirkungsgradoptimalen Betrieb wird der Motor mit einem Kraftstoff-Luft Äquivalenzverhältnis  $\phi < 0,5$  bzw.  $\lambda > 2$  betrieben (recht Seite der Abbildung 27). Dabei können aus der Abgasenthalpie je nach Leistung des Motors zwischen 4 % und 8 % der dem Motor zugeführten Kraftstoffenergie zur Dehydrierung bereitgestellt werden. Bei der auf Abgasenthalpie maximierten Betriebsstrategie (linke Seite der Abbildung 27) wird der Motor nahe dem stöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnis betrieben. Dadurch können zwischen 7 % und 10 % der zugeführten Kraftstoffenergie zur Dehydrierung bereitgestellt werden.

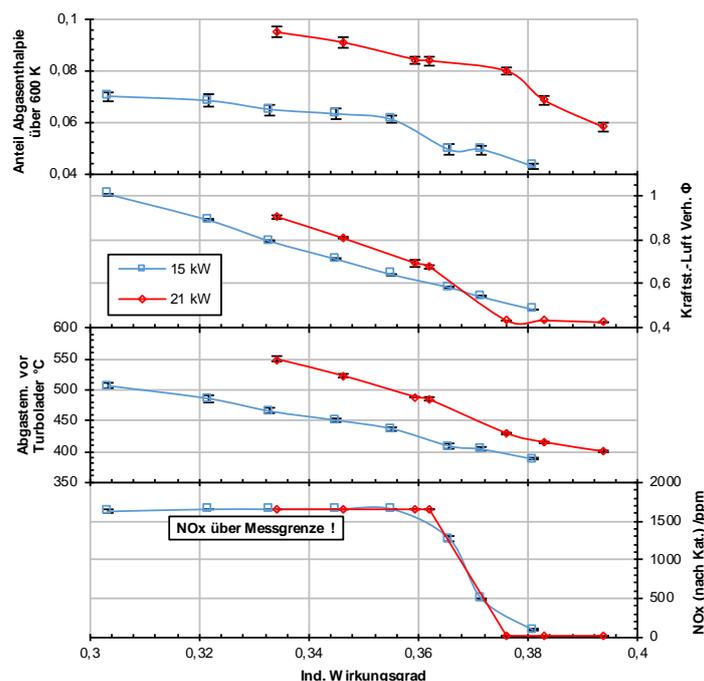


Abbildung 27: Betrieb des Wasserstoffmotors mit Niederdruck Direktinblasung bei 15 kW und 21 kW effektiver Leistung und unterschiedlichen Betriebsstrategien.

Im weiteren Projektverlauf wird für den Wasserstoff-Erdgas Mischbetrieb die Zusammensetzung des Gasgemisches so gewählt, dass die notwendige Dehydrierwärme für den Wasserstoffanteil vollständig aus der Abgasenthalpie gedeckt werden kann, wobei unterschiedliche Mischungsverhältnisse Wasserstoff/Erdgas betrachtet werden. Dieses Mischungsverhältnis ist neben seinem Einfluss auf die Energiebilanz der Dehydrierung ein wesentlicher Einfluss in den Betriebskosten von Blockheizkraftwerken. Der Wasserstoffanteil hat mit seinem Bereitstellungspreis erheblichen Einfluss auf das wirtschaftliche Potenzial der zu untersuchenden Anlage und stellt mit einer regenerativen Erzeugung einen direkten nachhaltigen Energieanteil dar. Über diesen zentralen Aspekt der nachhaltigen Energieversorgung hinaus verbessert die Wasserstoffzugabe die Verbrennung (Betriebsgrenzen und Wirkungsgrad) sowie die Emissionen von Erdgasmotoren (Stickoxide => Betriebslimitierung). Aus diesem Grund soll der Erdgas/Wasserstoff-Mischbetrieb für den Fall von regenerativ erzeugtem und in LOHC gespeichertem Wasserstoff in einem weiten Mischungsbereich untersucht werden.

Um den maximal möglichen Wasserstoffanteil im Brenngas abschätzen zu können, wird ein halbempirisches Modell der Verbrennung entwickelt, welches zum einen auf der theoretischen Verbrennungsgleichung von Kohlenwasserstoffen und zum anderen auf den Motormessungen bei reinem Wasserstoffbetrieb der ersten Projektphase basiert. Wesentlich die Abgasenthalpie und damit den Wasserstoffgehalt des Brenngases beeinflussende Parameter sind die Luftzahl (s. Abbildung 28, links) und die Lage des Verbrennungsschwerpunkts (s. Abbildung 28, rechts).

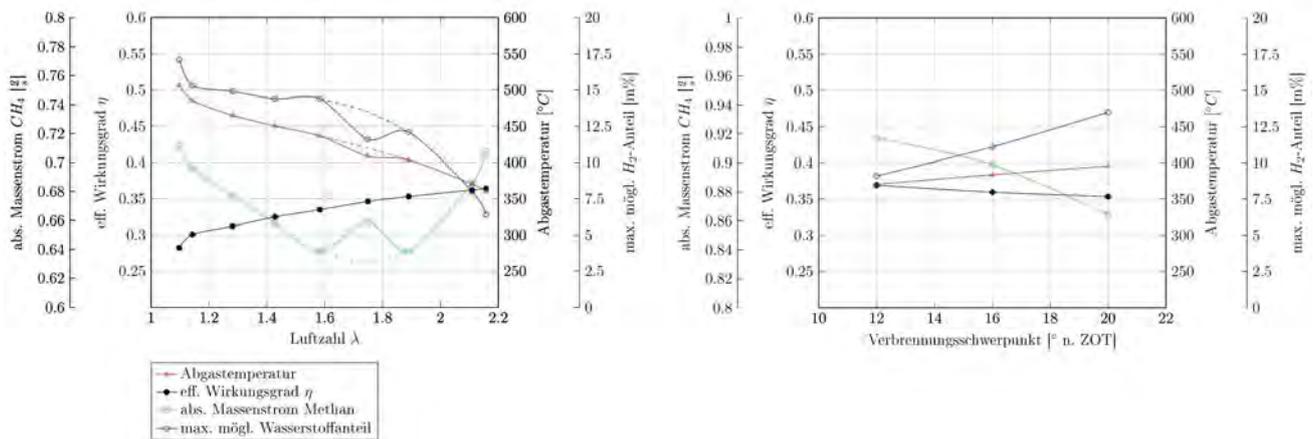


Abbildung 28: Messdaten (Wirkungsgrad und Abgastemperatur) und Ergebnisse (Wasserstoffanteil im Brenngas und absoluter Methanmassenstrom) der Berechnung für eine effektive Motorleistung von 21 kW und einen konstanten Verbrennungsschwerpunkt bei  $8^{\circ}$  n. OT (links) bzw. eine konstante Luftzahl  $\lambda = 2,35$  (rechts)

Als Ergebnis geht aus beiden Diagrammen hervor, dass der maximale Wasserstoffanteil im Brenngas zwischen 6 m% und 18 m% liegt. Um den Motor gesamtwirkungsgradoptimal betreiben zu können, ist eine Abmagerung des Gemischs auf Luftzahlen  $\lambda > 2$  und die Positionierung des Verbrennungsschwerpunkts bei  $8^{\circ}$  n. OT notwendig. Die damit verbundene Reduktion der Abgasenthalpie führt zu einer Verringerung des Wasserstoffanteils im Brenngas. Ein regenerativ optimaler Betrieb, d.h. minimaler Methananteil, wird bei Luftzahlen  $1,6 < \lambda < 1,9$  erreicht. Die Wasserstoffmenge im Brenngas beträgt in diesem Luftzahl-Bereich ca. 12 -13 m%. Dies entspricht einem Energieanteil des Wasserstoffs von 28 %.

Um das entwickelte Modell zu validieren, werden Messungen an einem Versuchsmotor im Wasserstoff-Methan-Mischbetrieb durchgeführt. Dazu wird ein vorhandener Vierzylinder-Motor auf Einzylinder-Betrieb umgerüstet.

Parallel zu den Vorbereitungen am Prüfstand wird ein Simulationsmodell des Versuchsmotors im Programm *GT Power* von *Gamma Technologies* erstellt. Die eindimensionale Modellierung der Prozesse im Motor ermöglicht es, schnell, effizient und mit ausreichender Genauigkeit die für das LOHC-System relevanten Daten zu berechnen und Wirkungsgradanalysen durchzuführen. Es ist mit allen aus den Motormessungen erzeugten Daten abgeglichen und kann herangezogen werden, um Ergebnisse in feiner Auflösung zu generieren.

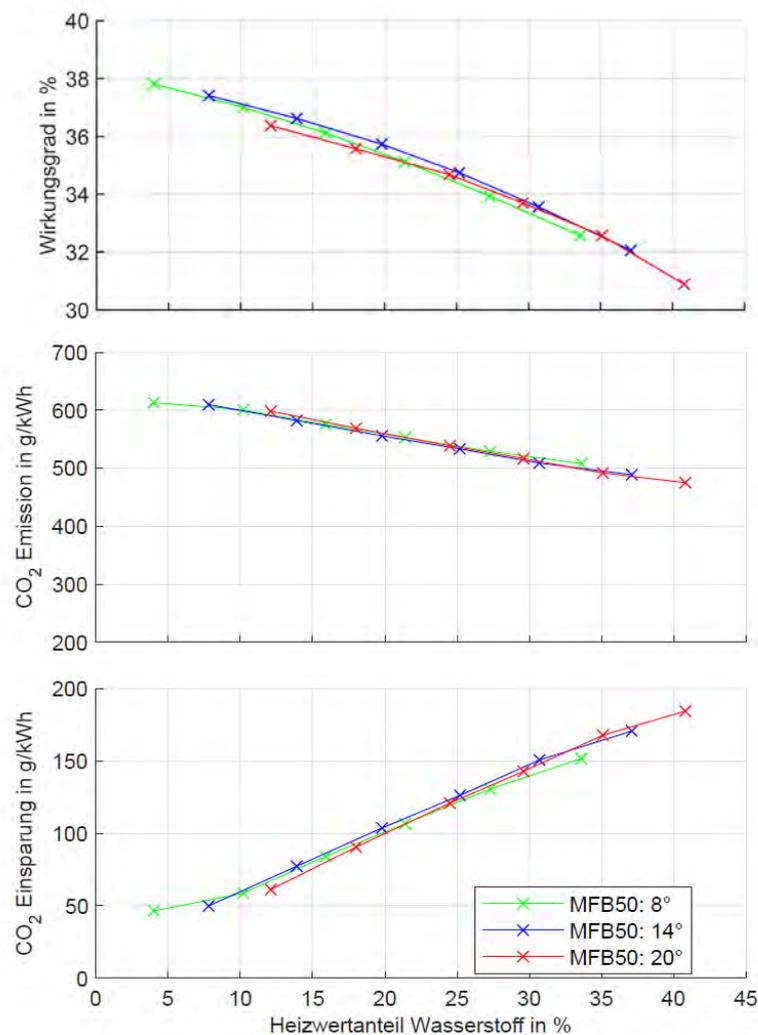


Abbildung 29: Verlauf des Wirkungsgrades, der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials über dem Heizwertanteil des Wasserstoffs im Brenngas

In Abbildung 29 sind als Endergebnis der Kombination aus Simulation und Motormessungen der Wirkungsgrad, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential über dem Wasserstoffgehalt im Brenngas dargestellt. Es wird der Fall vollständiger Deckung der Reaktionsenthalpie aus dem Abgas angenommen. Wie zu erwarten, sinkt der Wirkungsgrad mit steigendem Wasserstoffgehalt, da der Motor zunehmend so betrieben werden muss, dass ein größerer Anteil des Heizwertes des Brenngases im Abgas zur Dehydrierung bereitgestellt wird. Dieser nicht mehr als mechanische Leistung zur Verfügung stehende Anteil führt dann naturgemäß zu einem geringeren Wirkungsgrad. Bemerkenswert ist jedoch der Verlauf des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials, beziehungsweise der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der erwartete Fall, dass bei sehr hohen Anteilen an Wasserstoff der Wirkungsgrad soweit sinkt, dass dadurch der Gesamtbrennstoffmassenstrom so sehr steigt, dass der höhere Wasserstoffanteil überkompensiert wird, tritt hier nicht ein. Dies wäre an einem Wiederanstiegen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erkennen. Im untersuchten Bereich ist jedoch eine stete, wenn auch degressive Einsparung an CO<sub>2</sub> mit steigendem Wasserstoffgehalt zu beobachten. Noch höhere Wasserstoffanteile sind innerhalb der Grenzen der vom Motor tolerierten Randbedingungen nicht realisierbar.

Eine andere Möglichkeit den Wasserstoffanteil weiter zu steigern und respektive die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken bietet sich im Konzept der Transferdehydrierung. Dabei wird die Reaktionstemperatur gesenkt, indem das System Propanol – Aceton zwischengeschaltet wird. Untersuchungen im Labormaßstab zeigen, dass damit die erforderliche Temperatur von den ursprünglichen 300 °C auf 190 °C gesenkt werden kann. Dadurch steigt durch die größere Temperaturdifferenz der Anteil der zur Dehydrierung nutzbaren Abgasenthalpie, wodurch schlussendlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter sinken.

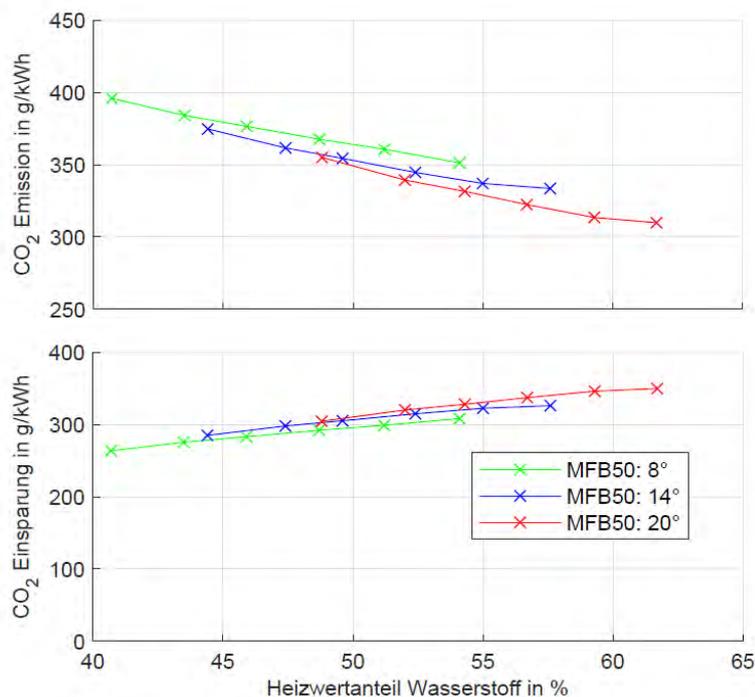


Abbildung 30: Verlauf des Wirkungsgrades, der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials über dem Heizwertanteil des Wasserstoffs im Brenngas für die Transferdehydrierung

Abbildung 30 zeigt deutlich, dass durch Einsatz der Transferdehydrierung ein weiteres CO<sub>2</sub>-Einsparpotential gehoben werden kann. Im Punkt geringster Emissionen lassen sich bis zu 350 g/kWh CO<sub>2</sub> einsparen. Abbildung 31 zeigt schließlich das Potential, wenn es gelingen sollte, die Dehydriertemperatur noch weiter zu senken.

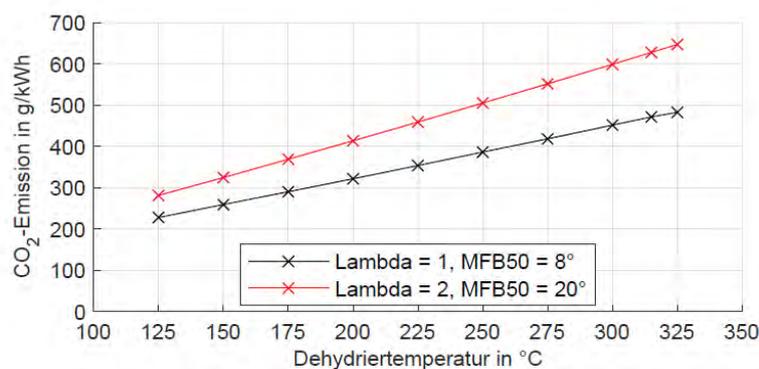


Abbildung 31: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Abhängigkeit von der Dehydriertemperatur für den wirkungsgradoptimalen Betrieb (rot) und den emissionsminimalen Betrieb (schwarz)

Dabei ist in rot der emissionsoptimale Betrieb, das heißt der beim niedrigsten indizierten Wirkungsgrad und in schwarz der effizienzoptimale Betrieb, das heißt beim besten Wirkungsgrad, dargestellt. Erwartungsgemäß sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der Dehydriertemperatur.

Anstelle des geplanten Wärmeübertragers für das LOHC am Motorprüfstand wird ein Stromerzeuger auf Wasserstoff-Erdgas-Mischbetrieb umgebaut. Dieser Stromerzeuger passt von seiner Leistungsklasse gut zur im Teilprojekt 2 umgesetzten Dehydrieranlage die mit einem Porenbrenner beheizt wird. Es wird der Dehydrierreaktor dieses Prüfstandes direkt in den Abgasstrang des Stromerzeugers integriert. So kann eine ursprünglich nicht geplante Symbiose zwischen den Teilprojekten geschaffen werden und es kann im laufenden Motorbetrieb vollumfänglich dehydriert werden.

Als Stromerzeuger wird dabei das Modell EU70is aus dem Hause Honda gewählt. Dieser 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 Thermoelement im Abgaskrümmner ausgestattet, um Temperatur und Lambda-Wert des Abgases zu überwachen.

Da Wasserstoff aufgrund seiner weiten Zündgrenzen, seiner niedrigen Zündenergie und der geringen Grenzspaltweite bei Saugrohrreinblasung 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 32 zeigt das 3D-Modell des Zylinderkopfes, das zur Platzierung des Injektors verwendet wird. Darin ist der Wasserstoffinjektor mit blauem Kunststoffgehäuse dargestellt.

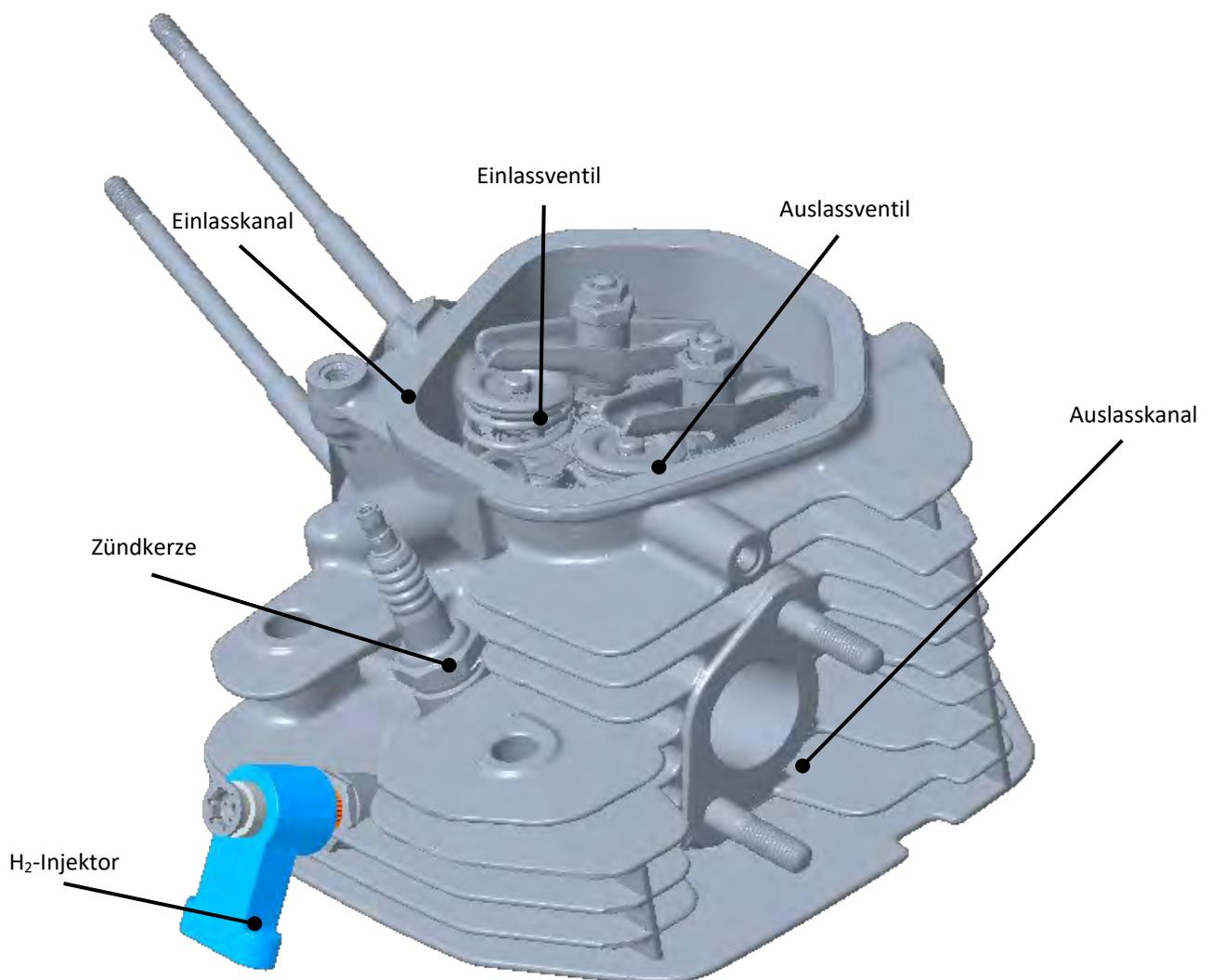


Abbildung 32: 3D-CAD Modell des Zylinderkopfes

Die genaue Anordnung des Injektors kann der Schnittansicht des Zylinderkopfes in Abbildung 33 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.

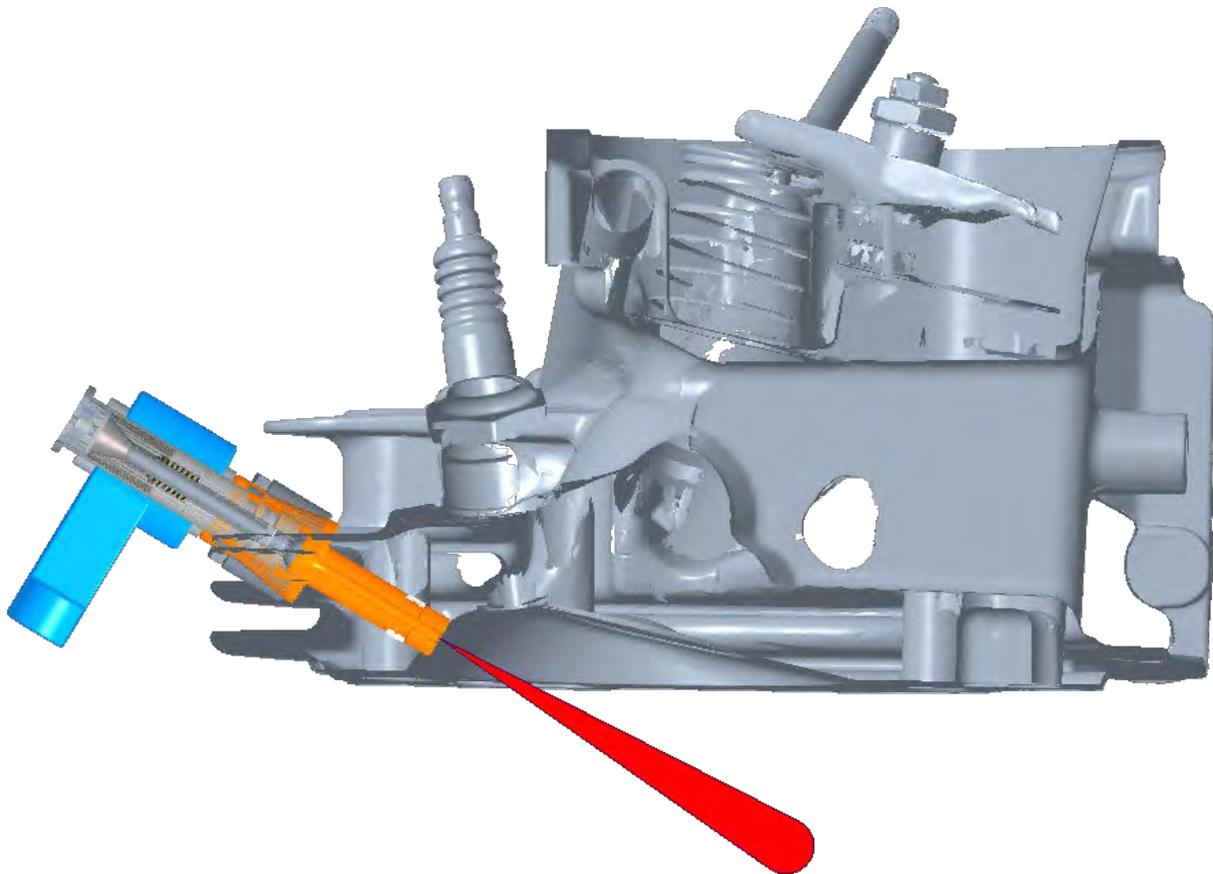


Abbildung 33: Schnittansicht des Zylinderkopfs mit Platzierung des Injektors und erwartete Wasserstoffkeulen (rot)

Zum Projektabschluss konnten Dehydrierung und Motorbetrieb zur Stromerzeugung erfolgreich kombiniert werden. Die Ergebnisse zeigen ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial von 20% relativ und 100 g/kWh absolut. Höchste Werte werden in einem emissionsoptimalen Betrieb mit maximalen Wasserstoffanteil und in einem Mischbetrieb mit Erdgas erreicht, wobei die CO<sub>2</sub>-Einsparung mit dem Wasserstoffanteil kontinuierlich ansteigt. Nicht nur in Bezug auf den motorischen Wirkungsgrad, sondern auch in der Gesamtbilanz wirkt sich eine Senkung der Dehydrier-Temperatur über eine Transferhydrierung positiv aus.

Die Kombination von regenerativ erzeugtem und in LOHC gespeicherten Wasserstoff und Erdgas zeigt damit ein schnell umsetzbares Minderungspotenzial von CO<sub>2</sub> Emissionen in Blockheizkraftwerken auf. Die vorgenannten Werte (Wirkungsgrad bis 38%) wurden auf Basis von kleinen Motoren mit Leistungen von 1-15 kW erreicht. In der Leistungsklasse 200 kW und höher können mit aktuellen Entwicklungen Wirkungsgrade von deutlich über 40% mit Wasserstoffmotoren erreicht werden. Diese Entwicklungen setzen auf der in diesem Projekt und seinen Vorläufern betrachteten Niederdruck-Direkteinblasung des Wasserstoffs auf. Beste absolute Werte sind für eine in vielen "Blockheizkraftwerken" gegebenen Kombination von Strom- und Wärmeerzeugung erreichbar.

## 4 Schlussworte

Das Projekt Speicher B konnte 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 liefert aufschlussreiche Ergebnisse. Eine verlässliche und genaue Methode zur vergleichbaren Charakterisierung von Katalysatoren für den Prozess wurde entwickelt. Verschiedene Systeme wurden gekoppelt um das Energiemanagement zu optimieren. Zusätzlich stützt eine umfangreiche Analyse der Wirtschaftlichkeit das Projekt. Abschließend kann ein konkretes Nutzungskonzept in einem BHKW eine deutliche CO<sub>2</sub> Reduktion belegen.

Die Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Institut für erneuerbare Energien Erlangen-Nürnberg sowie dem 2019 gegründeten Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) konnte im 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 Energie Campus Nürnberg erforscht wurden.

## 5 Vorträge & Poster

- [1] J. Bollmann, N. Schmidt, L. Zigan, S. Will. Heat supply for the dehydrogenation of a chemical hydrogen carrier using a burner. Proceedings of the European Combustion Meeting 2021
- [2] J. Bollmann, N. Schmidt, D. Beck, L. Zigan, S. Will. Dehydrierung eines flüssigen organischen Wasserstoffträgers mittels eines Porenbrenners. 30. Deutscher Flammentag - für nachhaltige Verbrennung, Hannover-Garbsen, 2021
- [3] A. Neubauer; L. Strauß; T. Russwurm; M. Wensing. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) als Speicher regenerativer Energie – effiziente Rückverstromung im BHKW. HYDROGEN DIALOGUE, 2020
- [4] 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
- [5] K. Mitländer; S. Dürr; D. Stempfle, P. Schühle; P. Preuster; P. Wasserscheid. One-Reactor Konzept für die effiziente Wasserstoffspeicherung in LOHC. EnCN Jahreskonferenz, 2020
- [6] J. Bollmann; A. Neubauer; N. Schmidt, L. Zigan; M. Wensing; S. Will. Nutzung der Abgasenthalpie zur Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers. EnCN Jahreskonferenz, 2020
- [7] A. Shoshi; E. Schlücker. Further improvements for preheating LOHC from hot compressed hydrogen gas. EnCN Jahreskonferenz 2020
- [8] A. Neubauer; L. Strauß; T. Russwurm; M. Wensing. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) als Speicher regenerativer Energie – effiziente Rückverstromung im BHKW. HYDROGEN DIALOGUE, 2020
- [9] T. Solymosi, P. Preuster, P. Wasserscheid, Dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) in a reactive plate heat exchanger, Jahrestreffen Reaktionstechnik, Würzburg 2020
- [10] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Dehydrogenation of a chemical hydrogen carrier using a porous media burner. 9th European Combustion Meeting, Lissabon, 2019
- [11] J. Bollmann, N. Schmidt, L. Zigan, S. Will. Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers unter Verwendung eines Porenbrenners. Deutscher Flammentag, Bochum, 2019
- [12] J. Bollmann, N. Schmidt, L. Gerboth, R. Medisch, L. Zigan; S. Will. Effiziente Wasserstofffreisetzung aus einem chemischen Wasserstoffträger mit einem Porenbrenner als Wärmequelle. Thermodynamik-Kolloquium, Duisburg, 2019
- [13] J. Bollmann; N. Schmidt, L. Gerboth, R. Medisch, L. Zigan; S. Will. Effiziente Wasserstofffreisetzung aus einem chemischen Wasserstoffträger mit einem Porenbrenner als Wärmequelle. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 2019
- [14] S. Dürr, L. Wagner, P. Preuster, P. Wasserscheid. Hydrogen Storage in a Pressure Swing Reactor – Development of a Continuous Reactor Design. 1st International Young Professionals Conference on Process Engineering, 2019
- [15] A. Durst; T. Russwurm; L. Strauß; M. Wensing. Liquid Organic Hydrogen Carriers as chemical hydrogen storage – Opportunities and challenges of reconversion into electricity with combustion engines. 13. Tagung Gasfahrzeuge, 2019

- [16] E. Emamjomeh; A. Shoshi; Y. Cen; E. Schlücker. Conceptual and Basic Design of an Innovative Catalytic Reactor for Dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers. 12th European Congress of Chemical Engineering (ECCE12), Florence, 2019
- [17] A. Shoshi; E. Emamjomeh; E. Schlücker. Enhancing the thermal efficiency of hydrogen compressor by the use of LOHC falling film. 12th European Congress of Chemical Engineering (ECCE12), Florence, 2019
- [18] H. Jorschick; P. Preuster; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Hot Pressure Swing Reactor Concept for Stationary Hydrogen Storage Applications. World Hydrogen Energy Conference, 2018
- [19] S. Dürr; L. Wagner; P. Preuster; P. Wasserscheid. Hydrogen Storage via Pressure Swing Reaction - from Batch to Continuous Reactor Design. World Hydrogen Energy Conference, 2018
- [20] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Konzept zur Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers unter Verwendung eines Brenners. Thermodynamik-Kolloquium, 2018
- [21] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Entwicklung und Optimierung von erdgas-beheizten Wasserstoff Freisetzungsanlagen für LOHC-Materialien. EnCN Jahreskonferenz, 2018
- [22] V. Grimm. Regional Differentiation of Renewable Energy Subsidies: A Long Term Assessment. iEnEC, 2018
- [23] V. Grimm. Podiumsdiskussion – Wie können Innovationen im Energiebereich gefördert werden? dena SET Lab Dialogveranstaltung am BMWI, 2018
- [24] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ÖGOR Workshop Wien, Wien, 2018
- [25] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 2018
- [26] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 2018
- [27] V. Grimm. Wie viel Dezentralität braucht die Energiewende? EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 2018
- [28] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. ENERDAY, 2018
- [29] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. 41st IAEE International Conference, 2018
- [30] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. iEnEC, 2018
- [31] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Aktionstage Nachhaltigkeit, 2018
- [32] P. Runge. Synthetische Kraftstoffe aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energien als Beitrag zur deutschen Energiewende. EnCN Jahreskonferenz, 2018
- [33] P. Runge. Synthetische Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft. Klimaschutzwoche, 2018
- [34] C. Sölch. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Bavarian Berlin Energy Research (BB<sup>2</sup>), 2018
- [35] Patrick Preuster, Peter Wasserscheid. Towards a hydrogen-free hydrogen economy – Catalytic challenges in the catalytic hydrogenation and dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers., European Fuel Cell Forum, Luzern, Schweiz 2017
- [36] Richard Brehmer, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Peter Wasserscheid. Dynamic hydrogen supply for flexible power supply., World Hydrogen Technology Conference, Prag, Tschechische Republik, 2017
- [37] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Effiziente Wärmeversorgung eines LOHC-Dehydrier-Reaktors mit einem Brenner. EnCN Sommerkonferenz, 2017
- [38] P. Runge. Economic comparison of different electrofuels for energy scenarios in 2035. Interne EnCN Konferenz, 2017

## 6 Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen wurden anhand des impact factors gerankt und absteigend gelistet.

- [1] 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
- [2] V. Grimm; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; K.G. Zöttl. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The effect of Market Splitting and Network Fee Regimes. *European Journal of Operational Research*, 2016
- [3] Ambrosius, M., Grimm, V., Sölch, C., & Zöttl, G. (2018). Investment Incentives For Flexible Demand Options Under Different Market Designs. *Energy Policy*, 118, 372 – 389, 2018

- [4] P. Runge, C. Sölch, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl, V. Grimm. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy*, 233-234, 1078, 2019
- [5] S. Dürr, S. Zilm, K. Müller, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid, "Experimental determination of the hydrogenation/dehydrogenation - Equilibrium of the LOHC system H0-/H18-dibenzyltoluene", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32583-32594, 2021
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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*, 712-720, 45(1), 2019
- [9] H. Jorschick, M. Vogl, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid. Hydrogenation of liquid organic hydrogen carrier systems using multicomponent gas mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31172-31182, 44(59), 2019
- [10] P. Preuster; Q. Fang; R. Peters; R. Deja; V. N. Nguyen; L. Blum; D. Stolten; P. Wasserscheid. Solid oxide fuel cell operating on liquid organic hydrogen carrier-based hydrogen – making full use of heat integration potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018
- [11] K. Müller, S. Thiele, P. Wasserscheid, Evaluations of Concepts for the Integration of Fuel Cells in Liquid Organic Hydrogen Carrier Systems. *Energy and Fuels* 33, 10324, 2019
- [12] H. Jorschick, A. Bulgarin, L. Alletsee, P. Preuster, A. Bösmann, P. Wasserscheid. Charging a Liquid Organic Hydrogen Carrier with Wet Hydrogen from Electrolysis. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 4186-4194, 7(4), 2019
- [13] H. Jorschick; P. Preuster; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Charging a Liquid Organic Hydrogen Carrier System with H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Gas Mixtures. *ChemCatChem*, 2018
- [14] H. Jorschick; P. Preuster; S. Dürr; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Operational stability of a LOHC-based hot pressure swing reactor for hydrogen storage. *Energy Technology*, 2018
- [15] T. Rüde; A. Bösmann; P. Preuster; P. Wasserscheid; W. Arlt; K. Müller. Resilience of Liquid Organic Hydrogen Carrier Based Energy-Storage Systems. *Energy Technology*, 2018
- [16] Timo Rüde, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, Karsten Müller, „Resilience of LOHC Based Energy Storage Systems“, *Energy Technology*, 2017
- [17] Jakob Albert, Patrick Preuster. Biogenic formic acid as a green hydrogen carrier. *Energy Technology*, 2017

## 7 Patente

- [1] A. Bösmann, P. Preuster, P. Wasserscheid, D. Geburtig. Verfahren und Vorrichtung zum Dehydrieren eines Wasserstoffträgermediums.
- [2] C. Paetz, B. Melcher, M. Schneider, A. Bösmann, D. Geburtig, P. Preuster, P. Wasserscheid. Vorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen von Wasserstoffgas.
- [3] D. Teichmann, A. Bösmann, D. Geburtig, P. Preuster, P. Wasserscheid, K. Müller, K. Mayrhofer, G. Sievi, „Vorrichtung und Verfahren zum Erzeugen von elektrischem Strom“.



ENERGIE  
CAMPUS  
NÜRNBERG

Fürther Str. 250  
90429 Nürnberg  
Tel.: +49 911/56854-99120  
Email: info@encn.de  
www.encn.de

Partner:



Unterstützt durch:



Gefördert durch:



Bayerische Staatsregierung

## Impressum

**Redaktion/Herausgeber:**  
Energie Campus Nürnberg

**Anschrift:**  
Energie Campus Nürnberg, Geschäftsstelle  
Fürther Str. 250, „Auf AEG“, 90429 Nürnberg  
Telefon: 0911 / 56854 99120  
Fax: 0911 / 56854 99121  
Mail: info@encn.de  
www.encn.de

**Gestaltung:**  
Energie Campus Nürnberg  
Datenstand: 31.12.2021

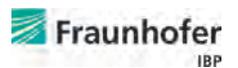
**© Bildrechte:**  
EnCN, EnCN/Kurt Fuchs, FAU, TH Nürnberg, Fraunhofer IISB, Fraunhofer IBP,  
HS Ansbach, H2B Zentrum Wasserstoff.Bayern, Sachverständigenrat



**ENERGIE  
CAMPUS  
NÜRNBERG**

Fürther Str. 250  
90429 Nürnberg  
Tel.: +49 911 / 56854 99120  
Email: [info@encn.de](mailto:info@encn.de)  
[www.encn.de](http://www.encn.de)

Partner:



Gefördert durch:

Unterstützt durch:



Bayerische Staatsregierung



Wirtschaftsreferat