



FORSCHUNGSBERICHT

2019



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

Vorwort



Im Jahr 2019 hat die Debatte rund um den Klimaschutz und die Energiepolitik weltweit eine völlig neue Dynamik entfaltet. Ausgehend von den „Fridays-for-Future“ ist Bewegung in viele Handlungsfelder gekommen. In Deutschland wurde mit dem Klimapaket der Bundesregierung eine Wende in der Klimapolitik eingeleitet, die eine Bepreisung von CO₂-Emissionen als Leitinstrument in den Mittelpunkt stellt. Die neue EU-Kommission strebt mit dem European Green Deal eine klimaneutrale Gesellschaft im Jahr 2050 an. Eine Umsetzung dieser Vision in den Mitgliedstaaten erfordert eine ambitionierte gemeinsame Klimapolitik und hohe Innovationskraft in Bayern, Deutschland und Europa.

Vollständige Klimaneutralität – das bedeutet hundert Prozent erneuerbare Stromerzeugung und über die Sektorenkopplung dann die vollständige Dekarbonisierung von Gebäuden, Verkehr und auch der Industrie. Der Weg in eine CO₂-neutrale Gesellschaft führt aber nicht ausschließlich über die direkte Nutzung von Strom, zum Beispiel in batterieelektrischen Fahrzeugen oder Wärmepumpen, sondern insbesondere auch über regenerativ erzeugte stoffliche Energieträger wie emissionsneutralen Wasserstoff und daraus hergestellte synthetische Kraftstoffe. Nur so können die Industrie und der Verkehr vollständig dekarbonisiert werden. Dies hat die Politik erkannt.

Zahlreiche Staaten erarbeiten zurzeit nationale Wasserstoffstrategien oder haben diese schon vorgelegt.

Neben dem konsequenten Ausbau der erneuerbaren Energien ist also der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft und die umfangreiche Sektorenkopplung die große Herausforderung der Energiepolitik der kommenden Jahre und Jahrzehnte. Damit verknüpft sind große industriepolitische Herausforderungen und Chancen für Bayern und Deutschland: Die Wasserstoffwirtschaft und die zunehmende Integration von Energiesystemen bieten ein immenses Wertschöpfungspotential für Unternehmen in Deutschlands Schlüsselindustrien. In den kommenden Jahren gilt es, dieses Potential in kluger Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik zu heben und die heimischen Wertschöpfungsketten zu verankern. Wir werden am EnCN unseren Beitrag dazu leisten.

Für die Umsetzung der ambitionierten Klimaziele und Transformationspfade braucht es ein exzellentes Verständnis des Zusammenspiels von Innovationen in verschiedensten Technologiefeldern und dem Umfeld, in dem die Produkte Märkte erobern. Wie kann der Energiebedarf von Gebäuden durch Kombination von innovativen Baustoffen, integrierter Gebäudetechnik und dem gezielten Einsatz von regenerativen Erzeugungs- und Speichertechnologien möglichst kostengünstig reduziert werden? Wie kann im Quartier die Integration von Wärme, Mobilität und Strom gelingen und wie ist es möglich, durch intelligente Vernetzung von Anbietern und Nutzern in neuen Märkten technologische und nicht-technologische Innovationen intelligent zu einem Gesamtsystem zu koppeln? Wie kann die deutsche Wirtschaft ihre

Vorreiterrolle nutzen, um im Rahmen von Industriepartnerschaften die Schlüsselposition in der zukünftigen globalen Wasserstoffwirtschaft einzunehmen?

Die Forscherinnen und Forscher am EnCN sind ideal aufgestellt, um diese Fragen aus der Sicht verschiedener Disziplinen zu beleuchten, die Perspektiven zusammenzuführen und Lösungen gemeinsam mit Wirtschaft und Politik zu erarbeiten. Im Team können wir veranschaulichen, was die klimapolitischen Ziele für Bayern bedeuten, was sich ändern wird und welche Chancen sich daraus ergeben. Ganz konkret wurde dies im Herbst 2019 mit der Gründung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) durch die Bayerische Staatsregierung. Das Zentrum – angesiedelt am Energie Campus Nürnberg und unter der Leitung zweier Wissenschaftler aus dem EnCN – bringt Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammen, um die Wasserstoffwirtschaft und insbesondere Wasserstoff in der Mobilität in Bayern schnellstmöglich voranzubringen und den Einsatz von Wasserstoff technologieoffen in der breiten Praxisanwendung zu erreichen. An dieser Entwicklung zeigt sich das große Potential der Zusammenarbeit über Institutionen und Disziplinen hinweg, wie sie am EnCN seit Jahren praktiziert wird. Die Metropolregion Nürnberg, seit jeher ein deutschlandweit herausragender Standort für die Energiewirtschaft, ist mittlerweile zu einem weithin sichtbaren Zentrum der Energieforschung mit großer Schlagkraft geworden. Der Energie Campus bündelt seit vielen Jahren die Kompetenz von sieben renommierten Forschungseinrichtungen und vereint nachgewiesene Exzellenz in der Forschung entlang der Kompetenzfelder der ansässigen Unternehmen. So wurde ein Kristallisationspunkt geschaffen, an dem eine Vielzahl von Akteuren zusammenspielen, um die Zukunft zu gestalten und Visionen mit der breiten Öffentlichkeit zu teilen. Die Bürgerinnen und Bürger erreichen wir mit unseren Themen in vielfältigen Veranstaltungsformaten.

Das Jahr 2019 war auch mit Blick auf das wissenschaftliche Personal am EnCN von einer hohen Dynamik gekennzeichnet. Zahlreiche Nachwuchswissenschaftler wurden auf renommierte Professuren im In- und Ausland berufen. Um deren Bindung an den EnCN zu erhalten wurde ein Fellowship-Programm initiiert, das auch über die Alumni hinaus unser nationales und internationales Netzwerk nachhaltig stärkt. Neue Impulse brachte zugleich die Schaffung von vier Tenure-Track Professuren an der FAU Erlangen-Nürnberg im Bereich der Energieforschung sowie die erfolgreiche Einwerbung einer Nachwuchsgruppe im Rahmen des Zentrum Digitalisierung.Bayern zum Themenkomplex „Digitale Technologien und menschliches Verhalten: Die Transformation des Konsumentenverhaltens im Energie- und Mobilitätssektor“. Am Standort des EnCN „Auf AEG“ ist auch im Umfeld des EnCN in den vergangenen Jahren ein lebendiges Netzwerk entstanden, dem zahlreiche Lehr- und Forschungseinrichtungen, wie z.B. das Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg oder der Nuremberg Campus of Technology, Netzwerke (z.B. die ENERGIEregion, das Energie-Technologische Zentrum 2.0 oder das BayWISS-Kolleg Energie) und Unternehmen aus der Energiebranche angehören.

Die großen Herausforderungen der Energiewende liegen im Bereich unserer Kernkompetenzen: mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien müssen die Themen Strom, Wärme und Mobilität zunehmend zusammen gedacht werden. Die Kopplung der Sektoren in einem intelligenten Energiesystem erfordert nicht nur in der Energiewirtschaft, sondern auch in der Forschung den Aufbau neuer und belastbarer Schnittstellen. Am EnCN gehen schon heute Technologieentwicklung und Systemforschung Hand in Hand. Mit den Themen Gebäude- und Industrieeffizienz, Energieeffiziente Antriebe, Speicher und Wasserstofflogistik, intelligente Stromnetze und Leistungselektronik, Photovoltaik, sowie Energiemarktdesign, Geschäftsmodelle und Akzeptanzforschung sind wir bestens aufgestellt, um die Zukunft der Energieversorgung im Zusammenspiel verschiedener Perspektiven mit zu gestalten.

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

April 2020



Prof. Dr. Veronika Grimm, Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung

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 2019	5
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN	15
Organisation des EnCN	16
Standort und Netzwerk.....	23
Jahresrückblick 2019.....	25
Ausblick 2020.....	33
EnCN GESCHÄFTSSTELLE.....	34
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	45
Projekt Effizienz	46
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN	98
Lehrstuhl für Leistungselektronik	99
W1-Professur „Energieinformatik“	107
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN	110
Projekt Energiemarktdesign	111
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEEN	135
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld	136
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“	154
FORSCHUNGSBEREICH NETZE	163
Projektübersicht Netze	164
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER	172
Projekt Speicher A – Speicher mit Systemrelevanz bis 2022	173
Projekt Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022	203

Highlights 2019

Effizienz



Herzo Base Energiespeicherhäuser

Der Reihenhauses-Komplex aus dem F&E-Projekt „Herzo Base“ wird im Folgeprojekt „Herzo Opt“ in ein Langzeitmonitoring überführt und über drei Jahre weiter wissenschaftlich begleitet, um das Verhalten der Gebäude und der Anlagentechnik über einen längeren Zeitraum zu bewerten. Darüber hinaus erfolgen die Betriebsoptimierung sowie die Weiterentwicklung prädiktiver Regelungsstrategien. Außerdem wird ein energetisches Monitoring der Gebäudehüllen sowie ein Leitfaden für den optimalen Einbau von Sensoren in Wandbaustoffe erstellt.

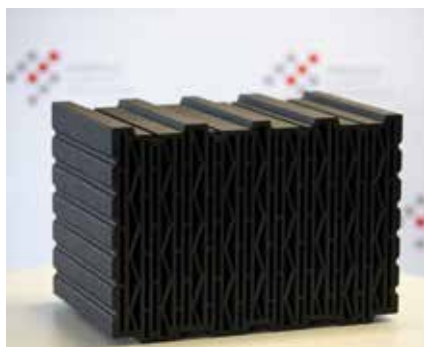
[>> Effizienz](#)



Höchste Wärmedämmung durch Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele

Um die Wärmedämmung von Gebäuden zu verbessern, wurden 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 $\lambda = 0,020 \text{ W/(mK)}$ auszeichnen.

[>> Effizienz](#)



Ziegel 2020: Entwicklung höchstwärmedämmender Wandbaustoffe mittels Rapid Prototyping

Mittels FEM-Berechnungsmethoden erfolgt die Wärme- und Schallschutz-technische Weiterentwicklung der Lochbildgeometrien von Wärmedämmziegeln. Die neuen Ziegelgeometrien werden mittels Rapid Prototyping aus Polymilchsäure additiv hergestellt, im Wärmeprüfstand vermessen und die Ergebnisse auf andere Ziegelformate aus Keramik übertragen. Das Bild zeigt einen Forschungsziegel aus PLA dessen Wärmedämmeigenschaften bereits weitestgehend optimiert sind. Durch gezielte Lochbildvariation gelingt die Erhöhung des Schalldämm-Maß um 6 dB, entsprechend um 316 % unter Beibehaltung der Wärmedämmeigenschaften.

[>> Effizienz](#)



Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Infrarot-Reflexbeschichtung

Durch Applikation einer Infrarot-Reflexbeschichtung in die inneren Hohlräume von Hochlochziegeln erfolgt eine Absenkung des Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,96$ auf $\epsilon = 0,19$ bis $0,36$, entsprechend um bis zu 80,21 %, je nach Rauigkeit der Ziegeloberflächen. Durch diesen Oberflächeneffekt können die äquivalenten Ziegel-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äq.}}$ im Mittel um 18,8 % abgesenkt und eine Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften in gleicher Höhe erzielt werden. Am bilateralen F&E-Projekt beteiligen sich 15 Mauerziegelwerke.

>> Effizienz



EU-Projekt „LightCoc“ (Horizon 2020):

Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight ceramic materials and structures

Das 4-jährige EU-Projekt startete im Januar 2019 mit 24 Projektpartnern aus 9 EU-Ländern. Ziel ist die Weiterentwicklung von nichtmetallisch-anorganischen Leichtbau-Werkstoffen. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar hat die Aufgabe neue Leichtgewicht-Hochlochziegel mit verbesserten werkstofftechnischen Eigenschaften zu entwickeln. Im Rahmen des Vorhabens erfolgt außerdem der Aufbau einer Pilotanlage für die Herstellung von Laborziegeln im EnCN sowie die Übernahme von Forschungsaufträgen aus EU-Ländern.

>> Effizienz



EU-Projekt „Hypobrick“ (Life):

Towards hypocarbonic economy – Development of non-fired building materials based on wastes

Das 3-jährige EU-Projekt startete im Oktober 2019 mit 5 Projektpartnern aus 2 EU-Ländern. Ziel ist die Entwicklung neuer, „ungebrannter“ Mauersteine – basierend auf industriellen Reststoffen über die sogenannte Geopolymer-Route. Geopolymere sind „kalt erhärtende“ Bindebaustoff-Systeme, die zur Verfestigung nicht gebrannt werden müssen. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar ist für die Ausarbeitung geeigneter Rezepturen sowohl für die Gießformgebung als auch für die Extrusion im Labormaßstab zuständig. Die beteiligten Ziegelwerke übernehmen die Rezepturen und führen Großversuche in der Produktion durch. Dabei wird der Tunnelofen-Brennprozess eingespart.

>> Effizienz



Fassade³: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes

In Zusammenarbeit der TH Nürnberg und dem ZAE Bayern sowie weiterer Partner wurden im zweiten Jahr des BMWi-Projekts „Fassade³“ das Konzept für ein modulares, stromerzeugendes Fassadenelement finalisiert und die Entwicklung der innovativen Komponenten abgeschlossen (organische PV, nachhaltiger Dämmstoff und selektivbeschichteter Sonnenschutzbehang). Geplant ist, die Elementfassade im Jahr 2020 an einem Wohngebäude zu demonstrieren und in einem Monitoring wissenschaftlich zu begleiten.

>> Effizienz



Prüfstand „Smart Energy Bench“

Im Rahmen der Programmsäule „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ des Landesprogramms wird 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 zukünftigen Smart-Grid-Funktionen.

>> Effizienz



UltraZohm: Neuartige Berechnungsplattform für Regelalgorithmen

Im Rahmen einer internationalen Kooperation zwischen der TU München, der Universidad Santiago de Chile und der TH Nürnberg, konnte 2019 ein erster Prototyp einer vorher nicht existenten heterogenen Berechnungsplattform für neuartige modellprädiktive sowie selbstlernende (KI) Regelalgorithmen entwickelt werden. Dieser „Enabler“ ermöglicht die Umsetzung neuartiger Regelalgorithmen für den effizienteren Betrieb von leistungselektronischen Systemen. Durch die Interdisziplinarität am EnCN, konnte diese Plattform im Teilprojekt „Energieeffiziente Antriebe“ erprobt werden.

>> Effizienz



Start 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 entwickelte und bei der Firma pressmetall Gunzenhausen GmbH im Einsatz befindliche Prozess Monitoring System.

>> Effizienz



Simulative Beurteilung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gussbetrieb

Im Rahmen des Green Factory Bavaria-Forschungsverbundes wurde vom Kompetenzzentrum Industrielle Energietechnik (KIEff) eine frei konfigurierbare Simulation des Betriebsablaufs eines Aluminium-Druckgussbetriebes entwickelt, mit der sich für verschiedene Betriebe die Auswirkung intralogistischer Maßnahmen auf Produktivität und Energieverbrauch simulieren lassen. Die Simulation wird verwendet, um die Einsparpotentiale bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Maßnahmen zu bestimmen.

[>> Effizienz](#)

Energiemarktdesign



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 Erzeugungs-kapazitäten durch geeignete Ausschreibungsformate, die Einführung mehrerer Preiszonen in Deutschland sowie die systemdienliche Abregelung von erneuerbaren Energien analysiert. Einige Maßnahmen führen zu substanziellen Wohlfahrtsgewinnen und zu Einsparungen beim Netzausbau.

[>> 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 Technologiemark, 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.

[>> 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.

[>> EMD](#)



© Shutterstock 765921106

Erzeugung, Logistik und Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen

Grüner Wasserstoff und darauf basierende synthetische Kraftstoffe sind CO₂-neutrale Alternativen zu konventionellen Erdölprodukten. Stromkosten stellen einen wesentlichen Teil ihrer Herstellungskosten dar, weshalb eine Produktion vorzugsweise in Regionen mit niedrigen Stromgestehungskosten stattfinden wird. Die Stromgestehungskosten erneuerbarer Technologien sind in den letzten Jahren deutlich gesunken, variieren global aber sehr stark. In einer gemeinsamen Arbeit mit dem Teilprojekte „Speicher B“ des EnCN werden mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, die sich durch besonders gute Verfügbarkeit und ein großes Potential erneuerbarer Stromerzeugung auszeichnen und aus denen Deutschland in Zukunft grünen Wasserstoff importieren könnte.

[>> EMD / Speicher B](#)



© Shutterstock 664440838

(Regulatorische) Unsicherheit und Risikoaversion im Strommarkt

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. Bereits eine geringe Wahrscheinlichkeit der Einführung mehrerer Preiszonen führt zu stark veränderten Investitionsentscheidungen. Unsicherheit hat dabei Einfluss auf den Netzausbau, die regionale Verteilung des Erzeugungszubaus sowie auf den Technologiemark. In einem Folgeprojekt wird aktuell die Rolle von Risikoaversion bei Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit untersucht.

[>> EMD](#)



@ Shutterstock 211310194

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 werden 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 407604208

Design flexibler Stromversorgungsstarife 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 Tarifkomponenten 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 Markt-geschehen wichtig. Dies führt zu dem mathematischen Studium von Gleichgewichts-problemen. 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



© Shutterstock 9623992

Buchungsvalidierung im europäischen Entry-Exit Gasmarkt

Gasnetzbetreiber sind verpflichtet Nominierungen, die sich innerhalb der unterzeichneten Buchungsverträge befinden, zu transportieren. Deshalb muss bei der Annahme von Buchungen durch den Netzbetreiber eine unendliche Anzahl von möglichen Nominierungen antizipiert und auf einen zulässigen Transport innerhalb des Netzes geprüft werden. In diesem Projekt wird das sehr anspruchsvolle Problem der Buchungsvalidierung mathematisch analysiert. Außerdem werden Algorithmen entwickelt, die für spezielle Netzstrukturen eine effiziente Validierung einer Buchung ermöglichen. Für Netzwerke ohne Kreise bzw. bestehend aus einem Kreis konnte bereits ein effizienter Algorithmus für die Buchungsvalidierung entwickelt werden.

>> EMD



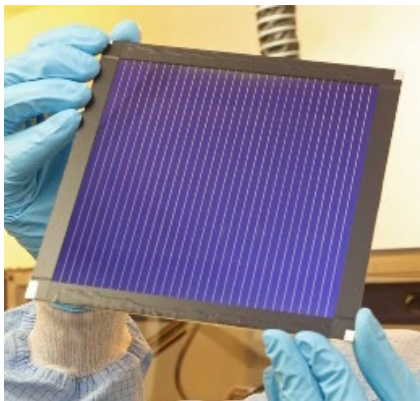
© Shutterstock 650548597

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 wird 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.

>> EMD

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 cm² bzw. 204 cm² 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.

>> 2D- und 3D-Freifform Beschichtungsprozesse zur Herstellung von PV-Elementen für das urbane Umfeld



Photolumineszenz zur optimierten Tintenformulierung

Innerhalb des EnCN wurden während der letzten Jahre effektive Photolumineszenz-Methoden zur Charakterisierung organischer Halbleiterschichten für die Photovoltaik entwickelt, mit denen Defekte, Morphologie und Zusammensetzung untersucht werden können. In einem neuartigen Ansatz wurden mit Hilfe von Hochdurchsatzmethoden systematisch tausende Tintenformulierungen gemischt und zur Optimierung der Komposition die Qualität der resultierenden Filme berührungslos und zeiteffizient mittels Photolumineszenz charakterisiert.

>> Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse



Preußisch Blaue elektrochrome Fenster

Elektrochrome Fenster basierend auf dem Preußisch Blau werden üblicherweise durch elektrochemische Abscheidung hergestellt. Hier wurde eine Tinte aus Preußen Blau- Nanoteilchen entwickelt, aus der solche Fenster aus der Lösung prozessiert werden können. Dies hat den Vorteil, dass die Fenster in Zukunft durch Drucken hergestellt werden können, und somit auch einfach mit gedruckten Solarzellen integriert werden, die dann die notwendige elektrische Versorgung der Fenster übernehmen.

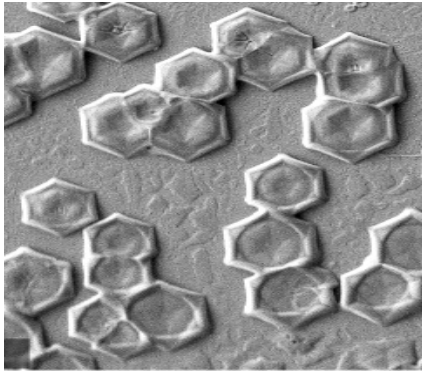
>> Smarte und schaltbare Fenster



Integration organischer PV-Module als Beschattungselemente in modulare Fassadenelemente

Im Rahmen des Verbundprojekts „Fassade³“ wurden die ersten organischen Photovoltaik (OPV)-Module für die Integration in die modularen und multifunktionalen Fassadenelemente zur energetischen Sanierung des Demonstrationsgebäudes fertiggestellt. Das ansprechende Erscheinungsbild der organischen Solarmodule ermöglichte die Integration der Photovoltaik in Glasvordächer, wo sie nicht nur zur Elektrizitätserzeugung, sondern gleichzeitig auch als Beschattungselemente dienen.

>> Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld



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 zeitaufwendiges 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.

[>> Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien](#)

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.

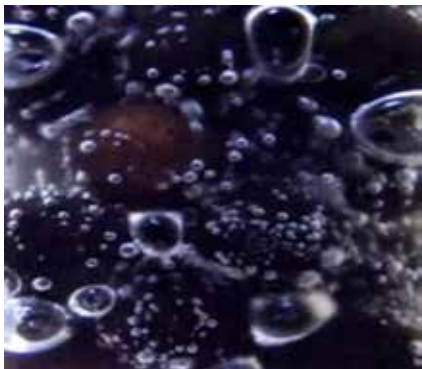
[>> Netze](#)



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](#)

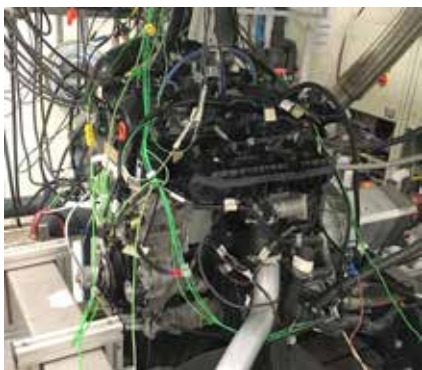
Speicher



Wasserstoff, Marsch! – Neue Katalysatoren für die Wasserstoffspeicherung

Die Katalyse ist die Schlüsseltechnologie der effizienten und sicheren Wasserstoffspeicherung mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger. Die unscheinbaren grauen Kugeln sind ein faszinierendes Forschungsthema, denn auch kleinste Änderungen an der Zusammensetzung oder dem Herstellungsprozess haben einen enormen Einfluss auf den gesamten Speicherprozess. Am EnCN werden Edelmetallkatalysatoren entwickelt und getestet, so dass die eingesetzte Platinmenge bei gleicher Leistung um mehr als das zehnfache verringert werden konnte.

[>> Speicher](#)



LOHC-basiertes Methan/Wasserstoff Blockheizkraftwerk

Durch ein innovatives Verbrennungskonzept kann ein leicht modifizierter Erdgasmotor auch mit Wasserstoff/Methan-Gemischen betrieben werden. Durch geschickte Prozessführung kann ein Teil der im Abgas des Motors enthaltenen thermischen Energie zur Freisetzung von H_2 aus flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHCs) genutzt werden. Ein solches Konzept kombiniert die hohe Speicherkapazität von LOHCs mit der Effizienz eines Blockheizkraftwerks und ermöglicht CO_2 -Einsparungen von über 30 %.

[>> Speicher](#)



Inbetriebnahme und erste Versuche am Carbonatspeicher im Labormaßstab

Am EnCN (Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik) wurde ein Carbonatspeicher im Labormaßstab in Betrieb genommen. Die Versuchsanlage ist auf eine Leistungsübertragung durch die zentral geführte Heatpipe von 2,5 kW bei einer Speicherkapazität von 15 kWh ausgelegt, sodass innerhalb eines Versuchstages komplett kalziniert bzw. karboniert werden kann. Dies ermöglicht eine hohe Anzahl an Versuchen zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von isotherm geführten Carbonatspeichern.

[>> Speicher](#)



2. Deutsches Doktorandenkolloquium Bioenergie am EnCN

Am 30. September und 1. Oktober 2019 trafen sich beim 2. Deutschen Doktorandenkolloquium Bioenergie ca. 60 Nachwuchs-WissenschaftlerInnen und etablierte ForscherInnen am EnergieCampus Nürnberg (EnCN), um aktuelle Forschungsarbeit und deren Ergebnisse zu präsentieren und miteinander zu diskutieren. Die vom BayWISS Verbundkolleg Energie und dem Lehrstuhl Energieverfahrenstechnik der FAU gemeinsam veranstaltete Tagung behandelte nicht nur technische Fragestellungen, sondern auch sozioökonomische bis hin zu ethischen Themen. Die teilnehmenden Doktorandinnen und Doktoranden kamen aus ganz Deutschland, sowie Griechenland und Finnland.

[>> Speicher](#)



Mikro-KWK-Pilotanlage geht nach erfolgreichem Labor-Langzeitversuch in den Feldtestbetrieb

Das in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik entwickelte Konzept eines wirbelschichtgefeuerten Stirlingmotors für die kleinskalige Kraft-Wärme-Kopplung konnte in einem ersten Langzeitversuch im Labor des EVT erfolgreich betrieben werden und ist damit nun bereit für den Feldtestbetrieb. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem EnergieCampus (EnCN) konnten dafür die SWW Wunsiedel gewonnen werden, welche ebenfalls als Modellregion für die in SP1-1 entwickelte reversible ORC-Technologie zählt. Die KWK-Pilotanlage wird am Wunsiedler Pelletwerk seit Mitte des Jahres in einer autarken Containerumgebung erfolgreich mit verschiedenen biogenen Festbrennstoffen im Dauerlauf betrieben.

[>> 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 zweijährigen intensiven Entwicklungsphase folgt nun die Inbetriebnahme. In der Pilotanlage soll der tägliche Ein- und Ausspeicherprozess von fluktuierenden Lasten in einer Leistungsgrößenordnung von 20 kW untersucht werden.

[>> Speicher](#)



Mauerziegel als spitzenlastfähiger Hochtemperatur-Speicher

In Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Karl (FAU) und Prof. Dr. Krcmar (THN) erfolgte der Aufbau einer speziellen Ofenanlage, in welcher industriell hergestellte Mauerziegel als thermische Speichermassen aufgeheizt und mit Wasser abgeschreckt werden können. Durch Variation der Formsteingeometrie werden thermische Spannungen minimiert und die Zyklenstabilität erhöht. Kommerziell erhältliche Hochlochziegel zeigen im Temperaturbereich zwischen 550 °C und 350 °C ein Verhältnis von eingespeicherter zu ausgespeicherter Energie von 75 %.

[>> Speicher](#)

Überblick über den EnCN

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

	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

Organisation



Die Organisation des Energie Campus Nürnberg besteht im Wesentlichen aus zwei Strukturen. Eine übergeordnete Leitungsstruktur, bestehend aus der *Wissenschaftlichen Leitung*, sowie der *Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung* des EnCN und der Geschäftsstelle des EnCN (dem „Dach“), sowie einer Projektstruktur, die sich aus insgesamt 6 Forschungsbereichen mit insgesamt 5 vom Freistaat Bayern geförderten Projekten zusammensetzt. Darüber hinaus arbeiten die Forscher auch in forschungsbereichsübergreifenden Drittmittelprojekten zusammen.

Themen- und Projektstruktur

Forschungsbereiche des EnCN



Abbildung 2: Überblick über die Forschungsbereiche entlang der Energiekette

Inhaltlich orientieren sich die 6 Forschungsbereiche des EnCN entlang der Energiekette von der Erzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zur effizienten Nutzung von Energie. Ein Überblick in die Struktur ist in Abbildung 2 dargestellt. Forschungsbereichsübergreifend bearbeiten die Forschungspartner Verbundprojekte, die auf dem Campus des EnCN zusammengeführt werden. Die Forschungsbereiche der 5 vom Freistaat Bayern geförderten Projekte sind Erneuerbare Energien, Energiespeicher mit Systemrelevanz bis 2022, Energiespeicher mit Marktreife bis 2022, Effiziente Energienutzung und Energiemarktdesign. Die Projekte sind noch einmal in 18 Teilprojekte mit insgesamt 44 Teilprojektleitern eingeteilt. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend und disziplinübergreifend organisiert. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilweise werden Arbeiten jedoch an anderen Orten durchgeführt, weil die Infrastrukturausstattung im EnCN nicht für alle Aktivitäten ausreichend ist.

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

In allen Forschungsbereichen bearbeiten die Wissenschaftler auch Drittmittelprojekte, die von verschiedensten Auftraggebern (Land, Bund, EU, Industrie) finanziert werden. Die Forschungsbereiche Netze und Energiemanagementtechnologien haben kein Projekt aus der Grundförderung des Freistaat Bayern und führen ausschließlich Drittmittelprojekte durch. Im Bereich Energiemanagementtechnologien ist eine W3-Stützprofessur aus der ersten Förderphase angesiedelt, aus der an der FAU der Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik (LEE) entstanden ist. Dies zeigt, dass am EnCN bereits jetzt nachhaltige Aktivitäten stattfinden, die in der Zukunft noch weiter ausgebaut werden.

Wissenschaftliche Leitung (WL)

Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN ist verantwortlich für die Steuerung der EnCN-Aktivitäten. Für jeden der 6 Forschungsbereiche wird aus den Reihen der am Forschungsbereich beteiligten Wissenschaftler ein Sprecher bestellt. Die Ausnahmen bildet der Bereich Speicher, der 2 Sprecher bestellt. Die Wissenschaftliche Leitung tagt in 6-wöchigem Rhythmus. Innerhalb der Wissenschaftlichen Leitung findet der Informationsaustausch über laufende Aktivitäten und Arbeitsstände in den Projekten statt. Die Wissenschaftliche Leitung berät und initiiert themenübergreifende Aktivitäten, die strategische Ausrichtung des EnCN sowie Maßnahmen Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung.



Abbildung 3: Wissenschaftliche Leitung

Die Wissenschaftliche Leitung besteht aus:

Vorsitzende der

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

Sprecher der
Forschungsbereiche

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

Erweiterte Wissenschaftliche Leitung (EWL)

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

Tabelle 1: Mitglieder der Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung

Name	Institution	Forschungsbereich
Dr. Jakob Albert	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Wolfgang Arlt	FAU, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik	Speicher
Prof. Dr. Christoph Brabec	FAU, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften HI-ERN	Erneuerbare Energien, Speicher
Prof. Dr. Arno Dentel	THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik	Effizienz
Prof. Dr. Armin Dietz	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
Dr. Hans-Joachim Egelhaaf	ZAE, Bereich Erneuerbare Energien	Erneuerbare Energien
Dr. Jonas Egerer	FAU, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie	Energiemarktdesign
Dr. Bernd Fischer	FhG IISB	Energiemanagement-Technologien
Prof. Dr. Hannsjörg Freund	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Florian Gallwitz	THN, Fakultät Informatik	Effizienz
Prof. Dr. Reinhard German	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Prof. Dr. Veronika Grimm	FAU, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie	Energiemarktdesign, Speicher
Prof. Dr. Gunnar Grün	THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik	Effizienz

Name	Institution	Forschungsbereich
	FhG IBP, Energieeffizienz und Raumklima	
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 Elektrische Energietechnik FhG IISB, Energieelektronik	Energiemanagement-Technologien
Prof. Walter Mehl	THN, Fakultät Design	Effizienz
Dr. Gert Mehlmann	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Dr. Georg Möller	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
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. Thomas Plankenbühler	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
Simone Steiger	FhG IBP, Energieeffizienz und Raumklima	Effizienz

Name	Institution	Forschungsbereich
Prof. Dr. Peter Wasserscheid	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Prof. Dr. Michael Wensing	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher
Prof. Dr. Stefan Will	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher
Prof. Dr. Gregor Zöttl	FAU, Professur für Volkswirtschaftslehre	Energiemarktdesign, Speicher

Geschäftsstelle

Zur Koordination ihrer Aktivitäten und zur Unterstützung der Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und der Wissenschaftlichen Leitung selbst, hat der EnCN eine Geschäftsstelle eingerichtet, welche ebenfalls aus EnCN-Fördermitteln finanziert wird. Diese Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Das Dach ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Das Dach bündelt auch die Zusammenarbeit mit dem Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um.



Abbildung 4: Team der Geschäftsstelle

Die Geschäftsstelle besteht aus:

Geschäftsführer	Dr. Alexander Buchele
Assistenz	Ioanna Dimopoulou
Projektmanagement	Kristin Zeug
Gebäudemanagement	Wolfgang Schlaffer

Förderverein EnCN e.V.

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

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

Lenkungsausschuss

Der Lenkungsausschuss besteht aus je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter der Leitungen der Partnerorganisationen und je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter von Institutionen, die den EnCN strukturell über einen längeren Zeitraum mit erheblichen finanziellen Mitteln unterstützen. Er berät über die Leitlinien für die Zusammenarbeit der Partnerorganisationen sowie die thematische Fokussierung des EnCN und berät die WL in allen Angelegenheiten.

Fachbeirat

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



Abbildung 5: Fachbeirat

Mitglieder des Fachbeirats

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

Berichtswesen

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

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

Der Jahresbericht besteht aus den Berichten der einzelnen Forschungsbereiche und Projekte. Er ist ein internes Dokument, um die Fördermittelgeber über den Fortschritt der Arbeiten und die Entwicklung des Energie Campus Nürnberg zu informieren. Dies ist der achte Jahresbericht und umfasst den Berichtszeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2019. Die Jahresberichte für die Jahre 2011 bis 2018 können auf Anfrage über die Geschäftsstelle des EnCN bezogen werden.

Zahlen und Fakten

Die Förderperiode verläuft sehr erfolgreich. Aktuell arbeiten 140 Forscherinnen und Forscher in den sechs Forschungsbereichen (49 EWL, 91 Mitarbeiter). Die Forschungsarbeiten verteilen sich auf eine Forschungsfläche von 5.200 qm und 30 Labors und Technikumsräume. Auf den 540 qm Veranstaltungsflächen fanden 2019 über 85 Workshops, Seminare, Vorlesungen, Diskussionsrunden und Informationsveranstaltungen statt.

Die Partner am EnCN haben seit Beginn der zweiten Förderphase insgesamt rund 22 Mio € (gegenüber 14 Mio. € 2018) an Drittmitteln eingeworben. Diese Mittel verteilen sich auf über 110 einzelne Projekte mit insgesamt mehr als 200 Partnern aus Industrie und Wissenschaft. In der zweiten Förderphase wurden bislang 16 Patente angemeldet.



Abbildung 6: Das EnCN Hauptgebäude bietet auf 5 Etagen mit 5000qm Fläche Raum für 150 Forscher und für Veranstaltungen mit bis zu 170 Besuchern.

Standort und Netzwerk

Für den EnCN wurde von den Kooperationspartnern im Frühjahr 2012 eine Immobilie im Nürnberger Westen „Auf AEG“ gemietet. Das Gelände befindet sich zwischen den Zentren von Nürnberg und Fürth, 2km von der Nürnberger Innenstadt entfernt und ist mit öffentlichen Verkehrsmitteln über den U-Bahn Anschluss sowohl vom Nürnberger, als auch vom Fürther Hauptbahnhof in wenigen Minuten erreichbar. Mit der A73 besteht ein unmittelbarer Autobahnanschluss, über den Erlangen in ca. 15min erreicht werden kann. Der Nürnberger Flughafen kann in ca. 15 min angefahren werden.



Abbildung 7: Der EnCN befindet sich in der Nürnberger Weststadt, auf dem ehemaligen AEG Gelände, direkt an der Fürther Straße.

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

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

Die Region

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

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

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

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

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

Netzwerk

Der EnCN ist mit zahlreichen Energieprojekten und –initiativen in der Region vernetzt und arbeitet eng mit ihnen zusammen. Abbildung gibt einen Überblick über die wichtigsten Netzwerkpartner.

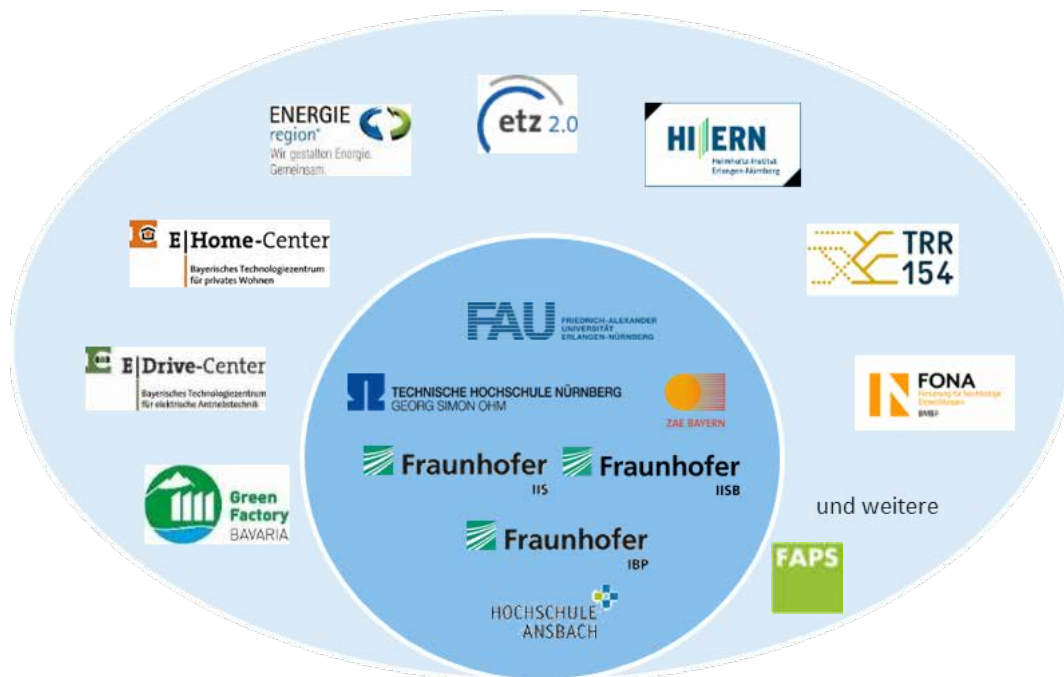


Abbildung 8: Mit dem EnCN vernetzte Energieprojekte und -initiativen

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

Jahresrückblick 2019

Wissenschaftliche Aktivitäten

Konferenzen und Seminare

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

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

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
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 an Decarbonized Energy Economy"	Prof. Veronika Grimm
25.10., EnCN	Treffen Deutscher Diskreter Optimierer	Prof. Frauke Liers
08.-10.12., EnCN	4th International Conference on Next Generation Solar Energy (NGSE4)	Prof. Christoph Brabec



NEUdialog



H2 Workshop



NGSE4 Konferenz

Erweiterte Wissenschaftliche Leitung

Im Rahmen der Sitzungen der Erweiterten Wissenschaftlichen wurden die in Tabelle 3 zusammengefassten wissenschaftlichen Beiträge vorgestellt.

Tabelle 3: Wissenschaftliche Beiträge in den EWL-Sitzungen

Datum	Forschungsbereich	Vortragstitel	Referent
28.01.	Speicher	Künstliche Intelligenz für die Anlagensteuerung in der Energietechnik	Dr. Dominik Müller
25.03.	Effizienz	Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik	Prof. Arno Dentel
13.05.	Energiemarktdesign	Electricity Market Design and the Transformation of the Energy System: Some Recent Insights from EMD	Prof. Veronika Grimm
08.07.	Effizienz	Ein Jahr Betriebserfahrung mit den Energiespeicherhäusern	Prof. Günter Kießling
08.07.	Netze	Echtzeitsimulation des LEES am Energie Campus Nürnberg	Dr. Gert Mehlmann
16.09.		Vorstellung BayWISS-Verbundkolleg Energie	Dr. Astrid Schweizer
21.10.		Vorstellung Ergebnisse Energiegipfel Bayern 2018/2019	Dr. Alexander Buchele

Berufungen und persönliche Auszeichnung

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

Tabelle 4: Rufe und persönliche Auszeichnungen am EnCN im Jahr 2019

Name	Beschreibung
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 ₂

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: 2019 bewilligte Großprojekte mit Bezug zum EnCN

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

Nachwuchsförderung

EnCN-Energiepreis

Der 2017 ins Leben gerufene und mit insgesamt 3.000 € dotierte EnCN Energiepreis wurde auch 2019 wieder auf der Jahreskonferenz verliehen. Die Vorstände des EnCN e.V. Christian Zens und Dr. Michael Fraas zeichneten insgesamt 6 Abschlussarbeiten aus verschiedenen Forschungsbereichen des EnCN mit je 500 € aus. Der vom EnCN e.V. ausgelobte

Preis prämiiert herausragende Abschlussarbeiten (Bachelor und Master), die im Umfeld des EnCN angefertigt wurden. Inhalte von förderungswürdigen Beiträgen sind neue Energietechnologien, rationelle Energienutzung und Effizienzsteigerung, Entwicklung umsetzbarer Anwendungen und Erhöhung der Sicherheit und/oder Anwendungsfreundlichkeit neuer Technologien.

In diesem Jahr wählte die Jury aus den insgesamt 37 Bewerbungen 6 Preisträger aus den unterschiedlichen Forschungsbereichen des EnCN aus. Die thematische Vielfalt der ausgezeichneten Arbeiten – von chemischer Verfahrenstechnik über Elektrotechnik bis hin zu mathematischer Modellierung – dokumentiert eindrucksvoll die Breite der Forschung am EnCN

Tabelle 6: Preisträger des EnCN-Energiepreis 2019

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
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 Rieselfbettreaktoren
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 zur Herstellung von organischen Solarquellen unter Verwendung eines Pipettierroboters
Thürauf, Johannes	Energiemarktdesign	Discrete Selection of Diameters for Constructing optimal Hydrogen Pipeline Networks



Abbildung 9: Energiepreisträger 2019

Reisestipendium

Der EnCN e.V. vergibt 2019 erstmals ein Reisestipendium, um Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftler zu motivieren und zu ermutigen, ihre Forschung auf internationalen Konferenzen vorzustellen und zu diskutieren. Die Initiative wurde positiv aufgenommen, so dass in diesem Jahr bereits 5 Stipendien in Höhe von jeweils 300 € vergeben werden konnten.

Tabelle 7: 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	45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Lissabon), Vortrag
Steger, Daniel	Speicher	5th International Seminar on ORC Power Systems (Athen), Vortrag

Kooperation mit dem Schülerforschungszentrum

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

Am 26.06. besuchten Schülerinnen und Schüler des Hochbegabten Modells Mittelfranken den EnCN, um die hier laufenden Forschungsarbeiten im Bereich Wasserstoff und insbesondere LOHC genauer kennenzulernen.



Abbildung 10: Schüler während der EnCN Jahrestagung 2019

Nürnberger Kinderuni am EnCN

Das Kulturreferat der Stadt Nürnberg organisiert die Kinderuni, bei der auch Wissenschaftler aus dem EnCN ihre Forschungsthemen kindgerecht präsentieren. Insgesamt fanden 2019 14 Vorlesungen aus der Kinderuni am EnCN statt.

Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit

Lange Nacht der Wissenschaften

Der EnCN war bei der 9. Langen Nacht der Wissenschaften wieder mit einem umfangreichen Ausstellungs-, Mitmach- und Vortragsprogramm beteiligt. Mit ca. 4.000 Besuchern wurde die Marke von 2017 noch einmal deutlich übertroffen. Dabei wurde das Präsentationsangebot aller Forschungsbereiche sehr gut angenommen, aufgrund der Aktualität der Themen lag ein besonderer Interessensfokus auf Wasserstofftechnologien und Mobilität.



Abbildung 11: Bilder zur Langen Nacht der Wissenschaften

Jahreskonferenz

Am 05.12. fand die Jahreskonferenz am EnCN statt. Im ersten, internen Teil hatte insbesondere der wissenschaftliche Nachwuchs am EnCN Gelegenheit, aktuelle Forschungsarbeiten vorzustellen. Im öffentlichen Teil der Konferenz wurde der diesjährige Gastvortrag von Prof. Rüdiger Eichel, Direktor am Forschungszentrum Jülich gehalten. Er zeigte anschaulich, welche entscheidende Rolle Power-to-X Technologien im zukünftigen Energiesystem spielen werden. Daneben gaben, wie üblich die EnCN-Wissenschaftler einen Überblick über die aktuelle Forschungsagenda.

Sommerkonferenz mit Sommerfest

Im Rahmen der Sommerkonferenz fand ein Workshop zum Thema „Klimaneutrale Mobilität“ statt. Hier entstanden spannende und interessante Lösungsansätze, von technologischen Entwicklungen bis hin zu multimodalen Mobilitätsplattformen. Im Anschluss an den Workshop ließen die EnCNler den Tag auf dem gemeinsamen Sommerfest bei bestem Wetter ausklingen.

Weitere Veranstaltungen

In unterschiedlichen Veranstaltungsformaten adressiert der EnCN aktuell relevante Themen für unterschiedliche Zielgruppen. So fanden 2019 unter anderem verschiedene Fachveranstaltungen in Kooperation sowie Informationsveranstaltungen aus der Reihe „Faszination Energie“ statt.

Tabelle 8: Termine aus der Veranstaltungsreihe „Faszination Energie“

Termin	Veranstaltung	Titel
27.02.	Faszination Energie	Lesung von Prof. Dr. Claudia Kemfert
17.07.	Faszination Energie	Energie & Architektur
11.11.	Fachforum in Kooperation mit Energieregion Nürnberg, Forum Klimaschutz und Nachhaltigkeit, Wirtschaftsreferat und IHK	Power-2-X, Forschung-Entwicklung-Anwendung
18.11.	Fachforum in Kooperation mit der IHK	Photovoltaik-Eigenstromversorgung in Unternehmen



Power-2-X



Lesung Prof. Dr. Kemfert



Photovoltaik Eigenstromversorgung

Besucher am EnCN 2019

- 09.01. Delegation aus Korea
- 15.01. Delegation aus China
- 23.01. Delegation aus USA (MIT)
- 05.02. Besuch Britta Dassler (MdB)
- 13.03. Besuch "Keep Energy in Mind"
- 13.05. Delegation aus Kolumbien
- 15.05. Delegation aus Korea
- 24.05. Delegation aus China
- 05.06. Delegation aus Chile
- 17.06. Delegation aus Shenzhen/China
- 26.06. Besuch Hochbegabten Modell Mittelfranken
- 23.07. Besuch Regierungspräsident Mittelfranken (Dr. Bauer)
- 19.09. Delegation aus Sri Lanka
- 09.10. Delegation aus der Ukraine
- 16.10. Delegation vom DGB
- 23.10. Delegation aus Zentralamerika
- 05.11. Delegation aus Seoul/Korea
- 11.11. Delegation aus dem bayerischen Landtag
- 20.11. Delegation aus China
- 22.11. Delegation vom CMIIT, China

Materialien für die Öffentlichkeitsarbeit

2019 entstand am EnCN eine Bilderserie unter dem Motto „Ich bei der Arbeit“. Auf den Bildern kann man den Wissenschaftlern bei ihrer Forschungsarbeit quasi über die Schulter schauen. Eine Auswahl der Bilder findet sich auch im EnCN-Kalender 2020 „Faszination Energie“.



Abbildung 12: Beispiele aus dem Fotoprojekt „Ich bei der Arbeit“

In den verschiedenen Forschungsbereichen wurden einseitige Flyer erstellt, die anschaulich die einzelnen Arbeitsschritte bei der Forschung verdeutlichen sollen. Ziel ist es, den oft komplizierten Prozess hin zu Forschungsergebnissen für Außenstehende verständlich zu machen.



Abbildung 13: Beispiele der Projektflyer

Im vergangenen Jahr sind zwei weitere Videos entstanden. Ein Überblicksvideo gibt einen kurzen und kompakten Gesamtüberblick über den EnCN, im zweiten Video werden die fertigen HerzoBase Energiespeicherhäuser im Detail vorgestellt. Dabei kommen auch die verantwortlichen Wissenschaftler und Bewohner zu Wort. Die Videos sind auf der EnCN-Homepage verfügbar.



Abbildung 14: Herzobase Video



Abbildung 15: EnCN Corporate Video

EnCN Netzwerk

Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B)

Am 05.09. wurde am EnCN bei einer gemeinsamen Pressekonferenz von Ministerpräsident Dr. Markus Söder, Wirtschaftsminister Hubert Aiwanger und Wissenschaftsminister Bernd Sibler das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) zur Entwicklung und Umsetzung der bayerischen Wasserstoffstrategie gegründet. Unter der Leitung der Vorstände Prof. Veronika Grimm und Prof. Peter Wasserscheid soll das Zentrum Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammenbringen, um die „Wasserstoffwirtschaft“ und insbesondere Wasserstoff in der Mobilität in Bayern schnellstmöglich voranzubringen und den Einsatz von Wasserstoff technologieoffen in der breiten Praxisanwendung zu erreichen. Die Koordinationsstelle des H2.B ist in den Räumen des EnCN angesiedelt.

EnCN Fellowship Programm

Um einen intensiveren Kontakt und gemeinsame Forschungsarbeiten mit Wissenschaftlern außerhalb des EnCN zu fördern, hat der EnCN ein Fellowship-Programm ins Leben gerufen. 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 sie als „Rising Stars“ ins Fellowship Programm aufgenommen werden. Aber auch Wissenschaftler, die nicht zuvor am EnCN tätig waren und einen engen inhaltlichen Austausch in Forschungsprojekten mit dem EnCN anstreben, können als „Fellows“ in das Programm aufgenommen werden. Aktuell hat der EnCN folgende Rising Stars und Fellows.

Tabelle 9: EnCN Rising Stars und Fellows

	Name	Position/Forschungsinstitut
Rising Stars	Prof. Gunnar Grün	Professor für Bauphysik an der Universität Stuttgart
	Dr. Lars Schewe	Lecturer in Operational Research an der School of Mathematics der University of Edinburgh
	Prof. Martin Schmidt	Professor für Nichtlineare Optimierung an der Universität Trier
	Prof. Christian Weindl	Professor an der Hochschule Coburg, Fachgebiet Elektrische Netze und Speicherintegration
Fellows	Dr. Harry van der Weijde	Lecturer an der School of Engineering der University of Edinburgh
	Prof. Miguel Anjos	Chair of Operational Research an der School of Mathematics der University of Edinburgh

Ausblick 2020

Eröffnung des Speicherhaus

Aktuell werden noch die Großgeräte im Speicherhaus installiert. Dabei entstehen die Demonstrationsanlagen für LOHC-Speicherung, Hochtemperatur-Carbonat-Speicher und der Niedertemperaturspeicher, kombiniert mit einer ORC-Anlage. Für das kommende Jahr ist eine gemeinsame Eröffnung in feierlichem Rahmen geplant.

Vernetzung der Wissenschaftlichen Aktivitäten

Wissenschaftliche und Erweiterte Wissenschaftliche Leitung sind in regelmäßigem Austausch, um die Vernetzung gemeinsamer wissenschaftlicher Aktivitäten zu stärken. Aktuell besteht der Fokus vor allem darauf, Nachwuchswissenschaftler noch gezielter in die EnCN-Forschung einzubinden, um beispielsweise den neu berufenen W1-TT-Professuren im EnCN-Umfeld einen möglichst optimalen Nukleus für gemeinsame Forschungsaktivitäten zu geben.

Veranstaltungen

Der EnCN wird nach 2019 zum zweiten Mal auf der E-Word Energy & Water und wie in den vergangenen Jahren regelmäßig auf der Hannover Messe als Aussteller vertreten sein, beide Male auf dem Gemeinschaftsstand von Bayern Innovativ.

Fachveranstaltungen sind unter anderem mit dem Innovationszirkel Hintermauerziegel und der Jahrestagung der Nichteisen-Schmelz- und Druckgussindustrie geplant.

Die Veranstaltungsreihe Faszination Energie wird sich im kommenden Jahr unter anderem mit den Themen Drohnen und Wasserstoff beschäftigen.

GESCHÄFTSSTELLE

Projektbericht 2019

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

1 Aktivitäten der Geschäftsstelle

1.1 Unterstützung der Forschungsaktivitäten

Die Geschäftsstelle unterstützt die Aktivitäten in den einzelnen Forschungsbereichen vor allem im organisatorischen Bereich und durch Förderung der Vernetzung, Kontaktvermittlung zu externen Projektpartnern und beim Betrieb der Infrastruktur.

Unterstützung Forschungsinfrastruktur

Die Projekte Speicher A und Speicher B werden in der zweiten Förderperiode ein gemeinsames Speichertechnikum (Speicherhaus) einrichten, in dem dann die in den Anträgen beschriebenen Speicheranlagen betrieben werden. Das Speicherhaus soll auch Besuchern einen kompakten Überblick über die erforschten Speichertechnologien und deren Anwendungsfelder geben. Für den Aufbau der Anlagen ist ein Ausbau der technischen Infrastruktur notwendig, um die erforderliche Medienversorgung und Sicherheitsstandards sicherzustellen. Dieser Ausbau wird von der Geschäftsstelle koordiniert und mit dem Vermieter abgestimmt. Aktuell werden die Demonstratoren in der Halle aufgebaut. Im Laufe des Jahres 2020 wird eine gemeinsame Eröffnung des Speicherhaus stattfinden.



Abbildung 1 - Speicherlabor

Vernetzung mit externen Projektpartnern

Tabelle 1 – Partner-Workshops und Veranstaltungen für EnCN Wissenschaftler

Datum, Ort	Veranstaltung	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
25.03., Nürnberg	Stadtentwässerung Nürnberg	Prof. Jürgen Karl, Speicher Prof. Peter Wasserscheid, Speicher
9./10.12., Brüssel	Partner-Workshop Wallonien (Tweed Cluster, Greenwin, CRM Group, Centexbel, Certech, u.a.)	Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Erneuerbare Energien Prof. Jürgen Karl, Speicher Prof. Peter Wasserscheid, Speicher Prof. Wolfgang Krcmar, Effizienz Prof. Arno Dentel, Effizienz
09.10., Nürnberg	Cenero, Wärmenetz 4.0	Prof. Jürgen Karl, Speicher Prof. Arno Dentel, Effizienz Prof. Martin März, Energiemanagement-Technologien
03.12., Nürnberg	Bilfinger Noell, Schwefelhaltige Brennstoffe	Prof. Jürgen Karl, Speicher Prof. Jürgen Wensing, Speicher

Die Geschäftsstelle koordinierte verschiedene Aktivitäten und Workshops, um EnCN-Wissenschaftler in Austausch mit potentiellen Projektpartnern zu bringen. Der bestehende gute Kontakt zur Stadtentwässerung Nürnberg wurde bei einem Workshop zu Alternativen der Sauerstoff-Bereitstellung und Wärmeintegration vertieft. Nach den Round-Table-Gesprächen mit wallonischen Partnern 2018 folgte nun im Dezember 2019 ein zweitägiger Workshop in Brüssel. Neben den Wissenschaftlern von beiden Seiten waren zur direkten Unterstützung von Projektinitiativen ein Vertreter von BayFor und des NCP in Wallonien eingebunden. Es gibt verschiedene konkrete Ansatzpunkte für gemeinsame Aktivitäten. Die Firma Cenero, Energieversorger auf dem AEG-Areal plant im Zuge der Entwicklung des Nordgeländes ein innovatives Wärmenetz. Hier gab es 2019 Vorgespräche, für 2020 ist eine gemeinsame Antragsstellung geplant.



Abbildung 2 – Netzwerk-Workshop Wallonien in Brüssel

EnCN-Sommerkonferenz

Am 25.07. fand die Sommerkonferenz in Form eines Workshops mit Sommerfest statt. Thema des Workshops war klimaneutrale Mobilität. Die Teilnehmer entwickelten dabei spannende technologische und organisatorische Lösungen für verbesserte Nachhaltigkeit im Mobilitätssektor. Außerdem hatten alle Beteiligten des EnCN darüber hinaus die Möglichkeit, auf dem anschließenden Sommerfest in ungezwungener Atmosphäre Forschungsthemen zu diskutieren und sich zu vernetzen. Die Gesamtorganisation für diese Veranstaltung wurde von der Geschäftsstelle übernommen.



Abbildung 3: Impressionen von der Sommerkonferenz mit Sommerfest

1.2 EnCN-Energiepreis und Reisestipendium

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

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



Abbildung 4: Einladungskarte zur Ausschreibung des Energiepreises 2019

2019 wurde vom EnCN e.V. in Zusammenarbeit mit dem EnCN ein Reisestipendium ins Leben gerufen und erstmals vergeben. Ziel ist die Förderung und Motivation von Nachwuchswissenschaftlern, ihre Forschungsergebnisse auf Konferenzen vorzustellen. Insgesamt konnten im ersten Jahr bereits 4 Stipendien vergeben werden. Die Geschäftsstelle hat gemeinsam mit der e.V.-Geschäftsstelle die administrativen Aufgaben rund um den Preis übernommen, die Ausschreibungsunterlagen erstellt, Bewerbungen gesammelt und gesichtet und die Juryarbeit begleitet. Das Stipendium wird auch 2020 wieder vergeben.

1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Veranstaltungen

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit war der EnCN 2019 auf einigen Veranstaltungen aktiv.

- E-World Energy & Water: Messestand
- Hannover Messe: Messestand
- NUEdialog-Kongress: Messestand
- Lange Nacht der Wissenschaften: Vorträge, Führungen und Mitmachaktionen im EnCN

- Jahreskonferenz mit Verleihung des EnCN-Energiepreises



E-World Messe



Hannover Messe



NUEdialog



Lange Nacht der Wissenschaften



EnCN Jahreskonferenz



Energiepreisverleihung

Faszination Energie

Die Geschäftsstelle hat die Veranstaltungsreihe Faszination Energie 2018 wiederaufgenommen. In diesem Format geht es darum, einem breiten (Fach-)Publikum verschiedene Aspekte eines nachhaltigen Energiesystems näherzubringen. Highlight 2019 war die Lesung von Prof. Claudia Kemfert am 27.02., auf der sich nach dem Lesungsteil eine umfangreiche und intensive Diskussion anschloss.



Abbildung 5 – Lesung Prof. Dr. Claudia Kemfert

Videos

2019 wurden weitere Videos erstellt. Zu den HerzoBase-Energiespeicherhäusern wurde ein ausführliches Projektvideo gedreht, bei dem auch die Wissenschaftler und Bewohner zu Wort kommen. Das Video „Mein Tag am EnCN“ gibt einen kurzweiligen Gesamtüberblick über unsere Forschungsthemen in Form eines Besuchs.

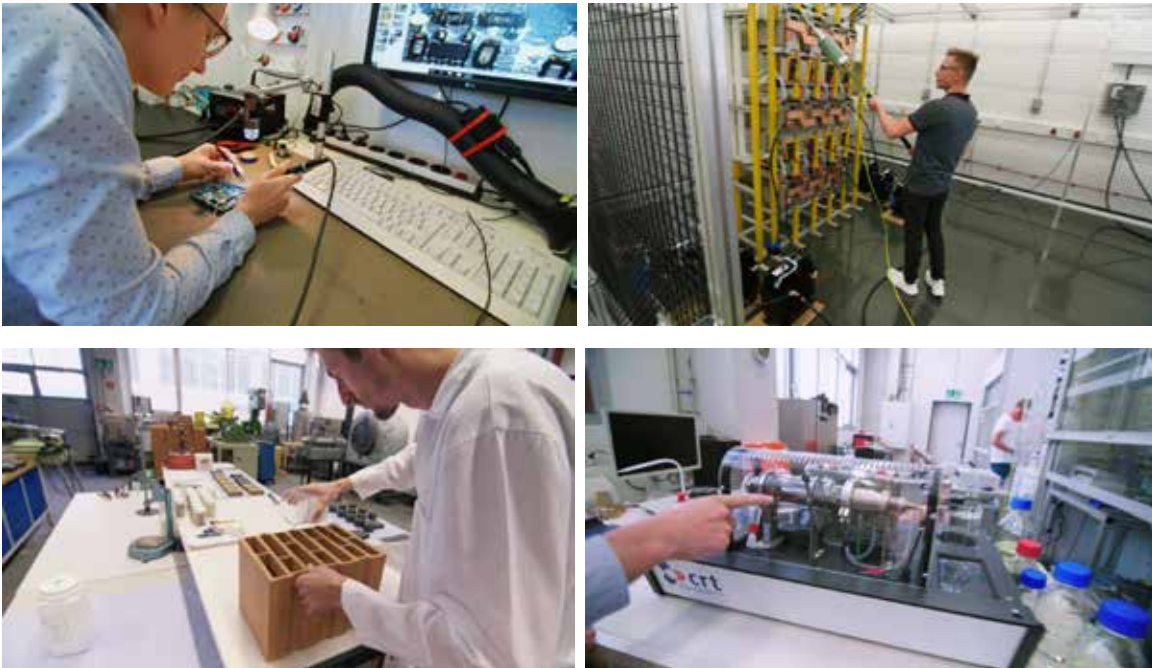


Abbildung 6 – Ausschnitte aus dem EnCN Corporate Video

Fotoserie „Ich bei der Arbeit“

Ziel der Fotoserie ist es, Forschung auch für Außenstehende begreifbar und erlebbar zu machen. So hat unsere Fotografin mit ihrer Linse den Wissenschaftlern bei ihrer Arbeit buchstäblich über die Schulter geschaut. Entstanden sind dabei spannende Einblicke in die ganz unterschiedlichen Forschungsalltage am EnCN. Auf 1-seitigen Flyern werden die unterschiedlichen Forschungsthemen vorgestellt. Die schönsten Bilder werden im EnCN Jahreskalender 2020 gezeigt.



Abbildung 7 – Bilder aus „Ich bei der Arbeit“



Abbildung 8 – Kalender Faszination Energie 2020

1.4 Organisation

Das „DACH“ des EnCN besteht aus 4 Mitarbeitern: dem Geschäftsführer Dr. Alexander Buchele, der Assistentin Ioanna Dimopoulou, dem Gebäudemanager Wolfgang Schlaffer und der Projektmanagerin Kristin Zeug. Zusätzlich unterstützen 2-3 wechselnde studentische Mitarbeiter die Arbeit der Geschäftsstelle. Aus organisatorischer Sicht ist ein Hauptanliegen die Verstetigung der Positionen in der Geschäftsstelle. Für die Positionen der Assistentin konnte dies bereits umgesetzt werden.



Abbildung 9 - Mitarbeiter der Geschäftsstelle Energie Campus Nürnberg

2 Schlussworte

2019 konnten zahlreiche Projekte und Vorhaben erfolgreich umgesetzt werden. Insbesondere durch den neuen Internetauftritt wird die inhaltliche und organisatorische Weiterentwicklung des EnCN deutlich. Die Öffentlichkeitsarbeit der Geschäftsstelle ist darauf ausgelegt, mit den begrenzten Ressourcen eine möglichst hohe Reichweite zu erzielen. Dies ist mit den zahlreichen Beteiligungen an überregionalen und internationalen Veranstaltungen sowie mit zahlreichen gut besuchten Veranstaltungen am EnCN gut gelungen.

Der gesamte Jahresbericht macht deutlich, dass die zweite Förderperiode gut läuft und in allen Forschungsbereichen hervorragende Ergebnisse erzielt werden. Auf dieser Basis muss nun das Fundament für die Zeit nach dem Ablauf der zweiten Förderphase Ende 2021 gelegt werden.

3 Veranstaltungen und Presse

3.1 Veranstaltungen am EnCN

Datum	Veranstaltung	Titel
09.01.	Besuch	Delegation aus Korea
15.01.	Besuch	Delegation aus China

Datum	Veranstaltung	Titel
16.01.	Workshop	ZIM-Netzwerktreffen mobinspec
21.01.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
23.01.	Besuch	Delegation aus USA (MIT)
23./24.01.	Seminar	FAPS-Seminar Robotik
30.01.	Workshop	Energiemixer
05.02.	Besuch	Besuch Britta Dassler (MdB)
14.02.	Workshop	Projekttreffen Fassade3
18.-20.02.	Workshop	Cluster-Workshop Kopernikus Ensure
27.02.	Vortrag	Lesung Claudia Kemfert
11.03.	Workshop	Initiativkreis KWK
13.03.	Besuch	Besuch "Keep Energy in Mind"
27.03.	Sitzung	Sitzung des Lenkungsausschuss
27.03.	Seminar	IT-Sicherheit in der dezentralen Energieversorgung
28.03.	Workshop	HI-ERN Workshop Zugprojekt
29.03.	Sitzung	Sitzung des Fachbeirat
02./03.04.	Seminar	Zieglerseminar
10./11.04.	Workshop	FAPS-Workshop
12.04.	Workshop	EU-Projekttreffen Nanohybrids
12.04.	Sitzung	Vorstandssitzung Energieregion
06.05.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
13.05.	Besuch	Delegation aus Kolumbien
15.05.	Besuch	Delegation aus Korea
20.05.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
22.05.	Workshop	MID-Demonstrator-Workshop
24.05.	Besuch	Delegation aus China
28.05.	Seminar	ECPE-Seminar
04./05.06.	Seminar	ECPE-Seminar
05.06.	Besuch	Delegation aus Chile
17.06.	Besuch	Delegation aus Shenzen/China
24.06.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
26.06.	Besuch	Hochbegabten Modell Mittelfranken
26.06.	Workshop	ERN-Workshop KI
27.06.	Workshop	HI-ERN Workshop Zugprojekt
02.07.	Workshop	Energiemixer
03./04.07.	Seminar	FAPS-Seminar Gedruckte Elektronik
05.07.	Sitzung	Vorstandssitzung EnCN e.V.
09./10.07	Seminar	ECPE-Seminar
12.07.	Workshop	Friday@noon
15.07.	Workshop	Workshop HerzoOpt
17.07.	Vortrag	Energie & Architektur

Datum	Veranstaltung	Titel
19.07.	Vortrag	Antrittsvorlesunf Prof. Matzner
23.07.	Besuch	Besuch Regierungspräsident Mittelfranken (Dr. Bauer)
25.07.	Konferenz	EnCN-Sommerkonferenz
05.09.	Pressekonferenz	Eröffnung Zentrum Wasserstoff.Bayern
17.09.	Sitzung	VdE Norbayern
19.09.	Besuch	Delegation aus Sri Lanka
26.09.	Workshop	HI-ERN Workshop Zugprojekt
27.09.	Workshop	HI-ERN Technologietransferforum
30.09.- 01.10.	Konferenz	Doktorandenkolloquium Bioenergie
09.10.	Besuch	Delegation aus der Ukraine
09./10.10.	Konferenz	Gießereitagung
16.10.	Workshop	ZIM-Netzwerktreffen mobinspec
16.10.	Besuch	Delegation vom DGB
17.10.	Workshop	Workshop "The Potential of Hydrogen in an Decarbonized Energy Economy"
14.10.	Workshop	Workshop Elektromobilität
21.10.	Workshop	Energie Digital
22./23.10.	Seminar	Zieglerseminar
23.10.	Besuch	Delegation aus Zentralamerika
25.10.	Sitzung	WiF Nürnberg
25.10.	Workshop	Treffen "Diskrete Optimierung"
28.10.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
31.10.	Workshop	H2.B Netzwerktreffen
04./05.11.	Seminar	ECPE-Seminar
05.11.	Besuch	Delegation aus Seoul/Korea
06.11.	Workshop	H2.B Netzwerktreffen
11.11.	Besuch	Delegation aus dem bayerischen Landtag
11.11.	Konferenz	Kooperationsveranstaltung P2X
12.11.	Sitzung	VdE AK Energieversorgung 4.0
12.11.	Sitzung	Mitgliederversammlung ERN
14.11.	Workshop	H2.B Netzwerktreffen
15.11.	Workshop	H2.B Netzwerktreffen
18.11.	Konferenz	Kooperationsveranstaltung Photovoltaik
20.11.	Besuch	Delegation aus China
22.11.	Besuch	Delegation vom CMIIT, China
25.11.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
26.-29.11.	Seminar	Energieberaternetzwerk
29.11.	Workshop	Stakeholdertreffen H2.B
02./03.12	Seminar	ECPE-Seminar
05.12.	Konferenz	EnCN-Jahreskonferenz
08.-10.12.	Konferenz	next generation solar energy
16.12.	Sitzung	Sitzung des Lenkungsausschuss
19.12.	Workshop	HI-ERN Workshop Zugprojekt

3.2 Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten, Forschungsthemen und Veranstaltungen war 2019 mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse.

Datum	Quelle	Titel
21.01.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltungen
21.01.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltungen
09.02.2019	Fränkischer Tag	Abgeordnete besuchen den Energie Campus in Nürnberg
20.02.2019	Nürnberger Zeitung	kurZNotiert - Veranstaltung Prof. Kemfert
27.02.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltungen
27.02.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltungen
27.02.2019	Mittelbayerische Zeitung	Veranstaltungen
13.03.2019	Nürnberger Nachrichten	So begleitet das Energie-Technologische Zentrum Start-ups
21.03.2019	taz.die tageszeitung	debatte - Strom fließt besser ungleich
29.03.2019	Volkszeitung Schweinfurt	Ein Vorreiter im Klimaschutz
29.03.2019	Schweinfurter Tagblatt	Ein Vorreiter im Klimaschutz
20.04.2019	Nürnberger Zeitung	Wie Energieausweise fürs Eigenheim zustande kommen
26.04.2019	Nürnberger Zeitung	"Wissenschaft auf AEG"
04.05.2019	Nürnberger Zeitung	Warum ein Entweder-Oder auf die falsche Spur führt
04.05.2019	Nürnberger Stadtanzeiger	"Hier lässt sich etwas machen"
06.05.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltungen
06.05.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltungen
10.05.2019	Nürnberger Zeitung	Wissenschaft Auf AEG
10.05.2019	Nürnberger Stadtanzeiger	Wissenschaft Auf AEG
20.05.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltungen
20.05.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltungen
24.06.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltungen
24.06.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltungen
03.07.2019	Nürnberger Zeitung	Wissenschaftsminister Sibler zu den Vorwürfen, an der Sanierung der Friedrich-Alexander-Universität zu sparen:
06.07.2019	Nürnberger Zeitung	Wirtschaftsreferenten fordern - Energiesparte von Siemens soll vor Ort sitzen
06.07.2019	Nürnberger Nachrichten	Siemens-Energiesparte
13.07.2019	Nürnberger Zeitung	Verteuerung der konventionellen Energie soll klimafreundliches Verhalten fördern
15.07.2019	Nürnberger Zeitung	Architekt plädiert für Nachhaltigkeit
26.07.2019	Bayerische Staatszeitung	Erlangen ringt um Sitz eines Energieriesen
02.08.2019	Bayerische Staatszeitung	Uwe Brandl, Präsident des Bayerischen Gemeindetags, über verschlafene Autokonzerne, Wasserstofftechnologie, ...
06.08.2019	WELT ONLINE	Söder verteidigt Schwenk in der Umweltpolitik
06.08.2019	Nürnberger Nachrichten	Initiative für Wasserstoff
06.08.2019	Nürnberger Nachrichten	"Klima und Konjunktur müssen in ein Paket"

Datum	Quelle	Titel
07.08.2019	Münchner Merkur	Bayern als Zentrum für Energie-Forschung
07.08.2019	Nordbayerischer Kurier	Söder verteidigt grünen Kurs
07.08.2019	Neue Presse Coburg	Söder verteidigt Schwenk zum Klimaschutz
07.08.2019	Frankenpost	Söder verteidigt Schwenk zum Klimaschutz
08.08.2019	Mittelbayerische Zeitung	Nürnberg begrüßt Wasserstoff
08.08.2019	Nürnberger Zeitung	CSU freut sich über Wasserstoff-Forschung
09.08.2019	Bayerische Staatszeitung	Nürnberg wird Zentrum für Wasserstoff-Forschung
04.09.2019	Nürnberger Nachrichten	Nürnberg wird zur Wasserstoff-Hauptstadt
04.09.2019	Nürnberger Zeitung	Ein neues Zentrum soll die Forschung mit dem Element in Bayern koordinieren
05.09.2019	WELT ONLINE	Söder und Aiwanger gründen Wasserstoff-Zentrum in Nürnberg
05.09.2019	WELT ONLINE	Bayern will Wasserstoff-Technologie ausbauen
06.09.2019	Nordbayerischer Kurier	Startschuss für Wasserstoff-Zentrum
06.09.2019	Nürnberger Zeitung	Industriepartner gehen Bündnis für umweltfreundliche Mobilität ein
06.09.2019	Nürnberger Nachrichten	Industrie springt auf den Wasserstoffzug auf
06.09.2019	Nordbayerischer Kurier	Setzen auf Wasserstoff: die Vorsitzende der wissenschaftlichen Leitung des Energie-Campus Nürnberg, Veronika ...
06.09.2019	Frankenpost	Startschuss für Wasserstoff-Zentrum
06.09.2019	Neue Presse Coburg	Startschuss für Wasserstoff-Zentrum
06.09.2019	Mittelbayerische Zeitung	Wasserstoff soll die Zukunft sein
06.09.2019	Münchner Abendzeitung	Nürnberg macht jetzt in Wasserstoff
06.09.2019	Straubinger Tagblatt	"Leuchtturmprojekt" Bayerns
06.09.2019	Landshuter Zeitung	"Leuchtturmprojekt" Bayerns
06.09.2019	Münchner Merkur	Bayern will Wasserstoff-Technologie ausbauen / Kompetenzzentrum soll Experten vernetzen - CSU-Klausur zu ...
06.09.2019	DIE KITZINGER	Bayern fördert Wasserstoff-Technologie
06.09.2019	Main-Post	Bayern fördert Wasserstoff-Technologie
06.09.2019	Fränkischer Tag	Bayern fördert Wasserstoff
06.09.2019	Coburger Tageblatt	Bayern fördert Wasserstoff-Forschung Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen gelten als Schlüssel für ...
06.09.2019	Bayerische Rundschau	Bayern fördert Wasserstoff
06.09.2019	Fränkischer Tag	Schaeffler setzt auf Wasserstoff
06.09.2019	Süddeutsche Zeitung	Déjà-vu auf AEG
06.09.2019	Schwäbische Zeitung	Kurz berichtet - Wasserstoff-Zentrum
07.09.2019	Mittelbayerische Zeitung	Nürnberg feiert Wasserstoff
13.09.2019	Bayerische Staatszeitung	Staatsregierung lässt sich "Zentrum Wasserstoff Bayern H2.B" in Nürnberg einiges kosten
18.09.2019	Nürnberger Zeitung	Richtungsweisende Entscheidung am Freitag - Wohin geht der Weg beim Klimaschutz?
26.09.2019	Bayerische Gemeindezeitung	Söder und Aiwanger gründen Zentrum Wasserstoff.Bayern
09.10.2019	Nürnberger Nachrichten	Energiewende
09.10.2019	Nürnberger Nachrichten	"Ohne Wind und Solar wäre es teurer"

Datum	Quelle	Titel
15.10.2019	Schwäbische Zeitung	Lindau könnte Modellregion für Brennstofftechnik werden
16.10.2019	Schwäbische Zeitung	Lindau als Modellregion für Brennstofftechnik
23.10.2019	Nürnberger Nachrichten	Veranstaltung "Wissenschaft Auf AEG"
23.10.2019	Nürnberger Zeitung	Veranstaltung "Wissenschaft Auf AEG"
23.10.2019	Nürnberger Nachrichten	Klimawandel als Chance begreifen
31.10.2019	Bayerische Staatszeitung	Kooperationen zwischen Bayern und Niedersachsen, aber auch mit Russland verleihen dem Thema Schwung
05.11.2019	Fränkischer Tag	Mit vollem Wasserstoff voraus
22.11.2019	Wirtschaftszeitung	Prof. Dr. Veronika Grimm
22.11.2019	Wirtschaftszeitung	Wasserstoff, das Öl der Zukunft
25.11.2019	Bote vom Haßgau	Thema Wasserstoff nimmt Fahrt auf
25.11.2019	Mittelbayerische Zeitung	Heftige Kritik am SüdOstLink / Die Trasse und die Kosten / aktuell im netz
05.12.2019	Bayerische GemeindeZeitung	Neue Energie für die Wende
06.12.2019	Bayerische Staatszeitung	Eine Veranstaltung der IHK Nürnberg zeigte die Schwierigkeiten auf, die entstehen, wenn Firmen auf Sonnenenergie setzen
11.12.2019	Nürnberger Zeitung	Metropolregion Nürnberg präsentiert sich in Brüssel
16.12.2019	Passauer Neue Presse	Die Weichen sind gestellt
18.12.2019	Nürnberger Nachrichten	Ministerrat
21.12.2019	Nürnberger Nachrichten	Der Blick in die rote Glaskugel

FORSCHUNGSBEREICH

Effizienz



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar

Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik

E-Mail
Wolfgang.Krcmar@encn.de

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

Web
www.encn.de/effizienz

EFFIZIENZ

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

Projektbericht 2019

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

Im Teilprojekt „Energieeffiziente Gebäudehülle“ werden Baustoffe der Gebäudehülle mit bisher nicht genutzten Effekten energieeffizienter ausgerüstet. Außerdem erfolgt die konstruktive Entwicklung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden unter Berücksichtigung neuer Stromversorgungskonzepte und Bilanzierungsmethoden. Neuentwickelte teilautarke Fassadensysteme mit integrierter organischer gedruckter Photovoltaik werden in der praktischen Anwendung erprobt. Durch den Einsatz eines Flugroboters (Drohne) erfolgt eine interaktive Gebäudevisualisierung. Die Arbeitsgruppe hat mit der Planung, dem Aufbau und dem Betrieb mit Monitoring von 8 Energiespeicherhäusern mit KfW Standard 40 Plus den Beweis erbracht, dass energieeffiziente Gebäude aus passiven und aktiven Komponenten funktionieren.

In den Teilprojekten „Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen“ und „Energieeffiziente Ansteuerkonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme“ werden neue Konzepte für Motoren und Antriebsstränge sowie deren Betriebsführung entwickelt.

Im Teilprojekt „User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben“ werden messtechnisch ermittelte Energiedaten in einem maßgeblichen Bereich der energieintensiven Industrie zu Kennzahlen verdichtet und nutzerbezogen ausgewertet und visualisiert.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar

Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Werkstofftechnik



E-Mail

Wolfgang.Krcmar@encn.de

Telefon

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

Web

www.encn.de

1 Energieeffiziente Gebäudehülle

Im Teilprojekt „Energieeffiziente Gebäudehülle“ sind Professoren und ihre Mitarbeiter aus drei Fakultäten der TH Nürnberg gemeinsam mit Prof. Dr. Grün vom Fraunhofer Institut für Bauphysik vernetzt und arbeiten gemeinsam mit ihren Mitarbeitern und Studierenden an der Weiterentwicklung energieeffizienter Gebäudehüllen. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse aus den einzelnen Unterprojekten vorgestellt.

1.1. Entwicklung und Ausrüstung neuer, höchstwärmedämmender Baustoffe mit verminderter Wärmeleitzahl;

Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik; Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“, Prof. Dr. W. Krcmar

Einleitung und Motivation

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 Wärmeleitzahl aufgebaut sein sollte. Den zweiten wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz leisten die verbauten aktiven Komponenten. Dabei handelt es sich um die Technische Gebäudeausrüstung mit regenerativer Stromerzeugung, Energiespeicher und Betriebsweise der Gebäude. Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ unter der Leitung von Prof. Dr. Krcmar, erforscht und entwickelt neuartige Wandbaustoffe mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften, u.a. von Mauerziegeln, Mauermörteln sowie von Innen- und Außenputzen. Das Ziel besteht insbesondere in der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit der Wandbaustoffe gegenüber dem Stand der Technik. Gebäude, die mit besser gedämmten Werkstoffen in der Gebäudehülle gebaut bzw. saniert wurden, zeichnen sich durch einen geringeren Energieverbrauch aus. Dies führt zur Einsparung von Primärbrennstoffen und entsprechender Absenkung von CO₂-Emissionen. Gleichzeitig wird der Bedarf an regenerativ erzeugter Energie abgesenkt und die Größe des benötigten Batterie- bzw. thermischen Speichers verkleinert.

Im Berichtszeitraum wurden von der Arbeitsgruppe die nachfolgend genannten Forschungsprojekte abgeschlossen bzw. bearbeitet und neue Projekte beantragt und Drittmittel-Einnahmen in bedeutender Größenordnung eingeworben:

- „NanoFIM: Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude – Herstellung, Ausrüstung und Charakterisierung von Massivwandbau- und Dämmstoffen mit Nanofaser-Isolationsmaterialien“; PTJ, FKZ: 03SF0543 B; laufendes Projekt.
- „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Absenkung des Emissionskoeffizienten“; Bilaterale Forschungsarbeiten in Zusammenarbeit mit der europäischen Ziegelindustrie; laufendes Projekt.
- „Ziegel 2020: Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“; PTJ, FKZ 03ET1526 A; laufendes Projekt.
- EU-Projekt Horizon 2020 „LightCocoe: Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures“; laufendes Projekt.
- EU-Projekt „Life-Hypobrick: Towards hypocarbonic economy – Development of non-fired building materials based on wastes“; neu angelaufenes Projekt.
- „Herzo Base – Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; PTJ, FKZ 03ET1364 A; abgeschlossenes Projekt.
- „Herzo Opt – Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“; PTJ, FKZ 03ET1641 A; neu angelaufenes Projekt.

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

Im Projekt „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaserisolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ (PTJ-Förderkennzeichen: 03SF0543B) erfolgt die Entwicklung und Anwendung neuartiger Dämmstoffe aus nanoskaligen Werkstoffen, nämlich Polystyrol-Nanofasern und Silica-Aerogelen. Dazu werden von unserem Projektpartner an der Freien Universität Berlin Alt-Styropormengen aus dem Baustoff-Recycling in Lösung gebracht und diese mittels Elektrospinning-Verfahren zu Polystyrol-Nanofasern und Nanofaser-Vliesen versponnen. Die hergestellten Nanofasern werden im Energie Campus Nürnberg in Wandbaustoffe integriert mit dem Ziel, deren Wärmedämmeigenschaften weiter zu verbessern.

Teil 1: Verbesserung der Wärmedämmung von Massivwandbaustoffen

Die in den ersten beiden Projektjahren durchgeführten Untersuchungen zur thermischen Charakterisierung der Nanofasern erzielten bereits vielversprechende Ergebnisse. Unter anderem konnte gezeigt werden, dass die „äquivalente Wärmeleitfähigkeit“ verschiedener Baustoffproben durch die flächige Applikation einer Nanofasermatte von lediglich 1 mm Schichtdicke senkrecht zur Wärmestromrichtung, drastisch verringert werden kann. Im Falle von Kunststeinen aus Geopolymeren und von Ziegelkeramik konnte sogar eine Halbierung der „äquivalenten Wärmeleitfähigkeit“ erreicht werden.

Im Gegensatz zu den durchgeführten Laborversuchen, bei denen die Baustoffproben zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit in Form massiver Platten hergestellt wurden, treten bei realen Wänden infolge der Baustoff-Geometrie neben der reinen Festkörperleitung auch Strahlungs- und Konvektionsprozesse auf. Die neuen Arbeiten im Berichtszeitraum zielten daher darauf ab, die Ergebnisse der Laboruntersuchungen auf den realen Anwendungsfall in der Baupraxis zu übertragen. Hierfür fanden zunächst Vergleichsmessungen von Ziegel-Wandausschnitten mit einer Fläche von 50 cm x 50 cm in einem speziell dafür vorgesehenen Wärmeprüfstand statt (Abbildung 1). Die Vergleichsmessungen zeigten, dass sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegel-Wandausschnitten, durch das Auflegen einer 1,5 mm dicken Nanofasermatte von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,156 \text{ W/(mK)}$ auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,118 \text{ W/(mK)}$, entsprechend um 24,4 % reduzieren lässt.



Abbildung 1: Links: Messung eines Wandausschnittes (50 cm x 50 cm) aus vier Einzelziegeln im Wärmeprüfstand. Rechts: Nach dem Einbau wird der Wandausschnitt mit einem thermischen Isolationsrahmen eingehüllt. Nach der „Verkipfung“ des Wärmeprüfstands um 90 ° liegen die Ziegel zwar nicht wie im üblichen Verband vor, aber trotzdem waagrecht angeordnet, wie in einer Wand. Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgt durch das Erfassen des Wärmestroms durch die Wand, welcher nach dem Anlegen einer definierten Temperaturdifferenz zwischen linker und rechter Wandseite hervorgerufen wird.

In einem weiteren Arbeitspaket wurden Messungen an einer eigens dafür angefertigten Versuchswand aus Hochlochziegeln durchgeführt. Auch hier wurde die äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch Erfassung des Wärmestroms und der Temperaturen an mehreren Positionen der Wandoberflächen bestimmt, nachdem ein definierter Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Wand eingestellt wurde. Die Messungen ergaben, dass sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Versuchswand durch die flächige Applikation einer lediglich 1,5 mm dicken Fasermatte auf der Kaltseite der Wand von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,222 \text{ W/(mK)}$ auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,190 \text{ W/(mK)}$ erniedrigt. Dies entspricht

einer Verringerung der „äquivalenten Wärmeleitfähigkeit“ um 14,4 %. Nanofaser-Isolationsmatten auf Basis von recyceltem Polystyrol weisen daher ein großes Potential für die energetische Optimierung von Wänden und Fassaden auf, insbesondere dort, wo eine Verbesserung der Wärmedämmung bei beschränkten Platzverhältnissen realisiert werden muss. Dies ist zum Beispiel in dicht bebauten Stadtteilen sowie bei der Altbausanierung oft der Fall.



Abbildung 2: Vergleichende Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstands einer Ziegelwand, jeweils ohne und mit applizierter Polystyrol-Nanofaser-Matte.

Teil 2: Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele

Um die Wärmedämmung von Wandbaustoffen weiter zu verbessern, wurden Versuche mit Silica-Aerogelen und polymeren Nanofasern aus Polystyrol durchgeführt. Die Nanofasern sollen hierbei eine Erhöhung der mechanischen Stabilität des Aerogels herbeiführen, ohne dabei die Wärmedämmeigenschaften des Grundmaterials negativ zu beeinflussen. Derart mechanisch stabilisierte Aerogele sollen anschließend in die Lochbild-Hohlräume von Ziegeln gefüllt werden und dadurch zu einer signifikanten Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften beitragen.

Nachdem in den Projektjahren 2017 und 2018 vor allem die Erarbeitung geeigneter Synthesewege zur Herstellung der faserverstärkten Silica-Aerogele im Fokus der Arbeiten standen, verschoben sich die Arbeiten im Berichtszeitraum in Richtung Feinoptimierung der erarbeiteten Rezepturen und der Verbesserung der hydrophoben Eigenschaften der Aerogel-Körper. Im Rahmen dieser Arbeiten konnten monolithische, faserverstärkte Silica-Aerogel-Proben hergestellt werden, die sich durch Rohdichten von nur $\rho = 0,15 \text{ g/cm}^3$ und äußerst niedrigen Wärmeleitfähigkeiten von nur $\lambda = 0,02 \text{ W/(mK)}$ auszeichnen. Durch ein der Sol-Gel-Aerogel-Synthese nachgeschaltetes, zweistufiges Hydrophobierungsverfahren wurden die Proben darüber hinaus mit einem hochwirksamen wasserabweisenden Effekt ausgerüstet (Abbildung 3). Kontaktwinkelmessungen ergaben dabei Werte von mehr als 140° . Derart ausgeprägte hydrophobe Eigenschaften sind für den geplanten Einsatz des Aerogels als Wandisolationsmaterial von größter Bedeutung, da eine nachträgliche Wasseraufnahme durch Adsorption zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen würde.



Abbildung 3: Links: Die äußerst geringe Rohdichte der Nanofaser-verstärkten Silica-Aerogel-Monolitthe kann eindrucksvoll durch das Auflegen auf ein Blütenblatt demonstriert werden. Rechts: Die Messung des Kontaktwinkels, welcher ein Wassertropfen auf der Oberfläche einer Aerogel-Probe ausbildet, ist ein Maß für die Hydrophobie des Isolierstoffs. Wird ein Kontaktwinkel von 90° überschritten, im vorliegenden Fall werden 140° erreicht, handelt es sich um hydrophobe, also wasserabstoßende Eigenschaften.

Neben der Feinoptimierung der erarbeiteten Rezepturen wurde außerdem der für die Aerogel-Synthese eingesetzte Hochdruck-Autoklav technisch verbessert. Mit Hilfe dieses Autoklaven werden die Aerogelkörper durch superkritisches CO₂ getrocknet. Durch dieses Upgrade ist es künftig möglich, den Zeitbedarf für den Aerogel-Trocknungsschritt signifikant zu senken. Außerdem können die benötigten Temperatur- und Druckbedingungen während der Trocknung noch genauer geregelt werden. Dies ermöglicht zum einen eine schnellere Durchführung von Versuchsreihen und erlaubt durch fein justierbare Trocknungsparameter auch eine Verbesserung der Qualität der hergestellten Aerogel-Proben.

1.1.2 Entwicklung einer Wärmedämmbeschichtung für hochwärmedämmende Wandbaustoffe“;

Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik; K. Zeyer, M. Eng. J.-S. Hildebrand und Prof. Dr. W. Krcmar

Im Arbeitspaket erfolgte die Weiterentwicklung einer Wärmedämm-Beschichtung für die inneren Hohlräume von Wandbaustoffen am Beispiel keramischer Mauerziegel. Der massiv wirksame Effekt beruht auf der Absenkung der Wärmeübertragung durch Strahlung durch eine Beschichtung mit niedrigem Emissionskoeffizient im inneren Lochmuster der Hochlochziegel. Im Berichtszeitraum wurden 15 großformatige, industriell hergestellte Ziegelsorten, die mit dem Effekt ausgerüstet wurden, jeweils ohne und mit applizierter Wärmedämmbeschichtung bzgl. Ihrer Emissionskoeffizienten und äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten untersucht. Daraus ging hervor, dass die Emissionskoeffizienten unbeschichteter Ziegel erwartungsgemäß zwischen $\varepsilon = 0,94$ bis $0,96$ liegen. Nach der Beschichtung resultieren Emissionskoeffizienten zwischen $\varepsilon = 0,19$ bis $0,36$. Damit gelingt die Absenkung der Emissionskoeffizienten um bis zu 80,21 % und entsprechend die Absenkung der äquivalenten Ziegel-Wärmeleitfähigkeiten und damit eine Verbesserung der Wärmedämmung je nach Lochbildgeometrie um bis zu 43,5 %.

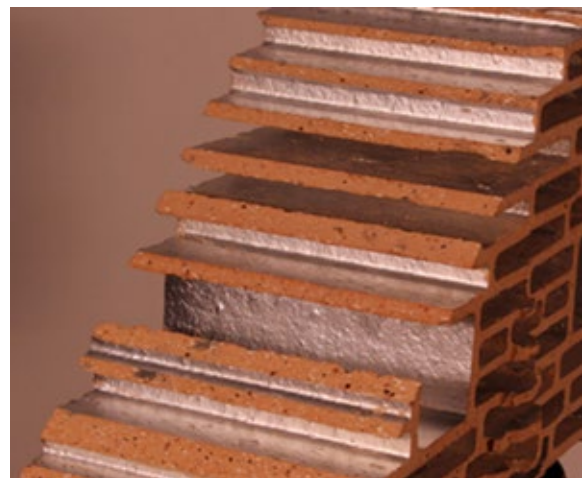


Abbildung 4: Geöffnete Beschichtungskammer mit eingelegtem Hochlochziegel (Links); in inneren Ziegel-Hohlkammern applizierte Wärmedämmbeschichtung (Rechts).

Alle übrigen werkstofftechnischen Ziegeleigenschaften bleiben dabei erhalten. Um die Deponiefähigkeit bzw. das Recycling der beschichteten Mauerziegel am Ende der Nutzungsphase zu bewerten, erfolgte die Durchführung von Eluationen mit Wasser und die Durchführung von Spurenelement-Analysen der Wirksubstanz. Daraus ging hervor, dass bei Ablagerung der Abrissziegel auf einer Bauschutt-Deponie keine Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind. Es resultieren folgende Ergebnisse:

- Minderung der Wärmeübertragung durch Strahlung um bis zu 80,21 %
- Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um bis zu 43,5 %
- Verbesserung der Wärmedämmung der Ziegel um bis zu 43,5 %
- Massive Primärenergie-Einsparung für die Gebäudebeheizung bei Einsatz der Ziegel im Baugewerbe
- Massive Minderung der CO₂-Emissionen bei der Gebäudebeheizung

Der hier vorgestellte Effekt zur Verbesserung der Wärmedämmung beruht auf einem bisher in der Ziegelindustrie und der gesamten Baustoffindustrie nicht genutzten physikalischen Gesetz und kann auf alle Wandbaustoffe mit Hohlraumstrukturen übertragen werden. Wenn es gelingen sollte, den Effekt großtechnisch in der Bauindustrie

einzuführen, wobei sowohl der Neubau, als auch die Altbausanierung in Frage kommen, so resultiert eine enorme Einsparung von Primärenergie für die Gebäudebeheizung sowie zugehöriger CO₂-Emissionen und damit ein bedeutender Schritt zur Erreichung der Ziele der Energiewende.

Ausblick: Die Vision der Arbeitsgruppe und der beteiligten Ziegelwerke ist die Planung, der Aufbau und das Monitoring eines entsprechend ausgerüsteten Demonstrator-Gebäudes als Musterhaus für die Bauindustrie.

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 Pr

Im Forschungsprojekt (PTJ-FKZ 03ET1526A) besteht das Ziel darin, die Lochbildgeometrie von Mauerziegeln so auszulegen, dass die voneinander abhängigen physikalischen Ziegeleigenschaften, nämlich minimale äquivalente Wärmeleitfähigkeit und maximale Schallabsorption optimal eingestellt sind. So soll beispielsweise eine weitere Verbesserung der Wärmedämmung sich nach Möglichkeit nicht auf eine Verschlechterung der Schallschutzeigenschaften auswirken. Das Ziel wird u.a. durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode in Verbindung mit einem nachgeschalteten 3D-Druck der gewünschten „Ersatzziegel“ aus Polymilchsäure (PLA) erreicht. Dafür werden in Frage kommende Variationen der Ziegelgeometrie gezeichnet und dienen als Grundlage für die separate Durchführung einer wärme- und einer schalltechnischen FEM-Simulation. Die im Idealfall in beiderlei Hinsicht optimierten Lochbildgeometrien entstehen nach Durchlaufen mehrerer Iterationsschritte aus den jeweils vielversprechendsten Ziegelgeometrien. Die so optimierten Ziegel werden anschließend maßstabsgetreu mittels 3D-Druck aus PLA hergestellt und werden im Wärmeprüfstand auf ihre äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten geprüft. Die dabei erzielten Ergebnisse können auf die wärmetechnischen Eigenschaften keramischer Hochlochziegel übertragen werden, obwohl sich die thermischen Leitfähigkeiten beider Werkstoffe unterscheiden. Der Unterschied in den thermischen Leitfähigkeiten beider Werkstoffe wird entsprechend berücksichtigt. Der hier verwendete 3D-Drucker gehört mit einem Druckvolumen von einem Kubikmeter zu den größten Rapid Prototyping-Druckern im fränkischen Raum. Innerhalb von etwa acht Tagen werden in seinem Inneren etwa 1,5 bis 2 Kilometer PLA-Rundschnur („Filament“) zu einem aus 417 Lagen bestehenden massivem Ziegel-Demonstrator verschmolzen.

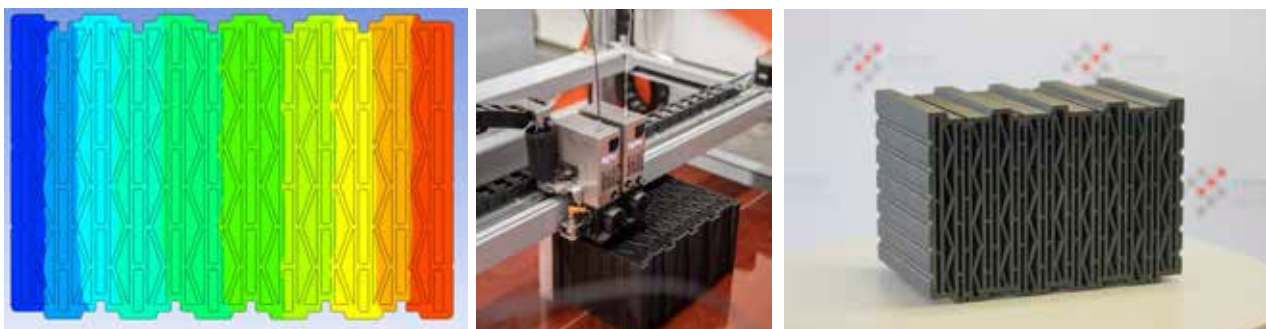


Abbildung 5: Simulation der Temperaturverteilung (blau: 5 °C bis rot: 15 °C) innerhalb eines kommerziell erhältlichen Ziegels mit der sogenannten „HV“-Lochung (Links). Zugehöriger 3 D-Druck aus PLA (Mitte) und fertiger „Ersatzziegel“ aus PLA vor der Schallschutz-Optimierung (Rechts).

Aus der Erkenntnis, dass die Anregbarkeit resonanzfähiger Strukturen im Inneren der Ziegel-Geometrien zur Verringerung des Schallabsorptionsvermögens im entsprechenden Frequenzbereich führt, konnte eine einfache, praxistaugliche und auf alle Lochbild-Geometrien von Hochlochziegeln anwendbare Methode entwickelt werden, die eine deutliche Steigerung des Schalldämm-Maßes verspricht. Die dabei erzielbare Verbesserung des Schallabsorptionsvermögens hängt stark von der Ziegel-Geometrie und anderen Werkstoffeigenschaften ab – aber, selbst unter ungünstigen Voraussetzungen verspricht dieses Verfahren mit einer Verbesserung der Schallabsorption zwischen 3 bis 6 dB einen buchstäblich hörbaren Unterschied.

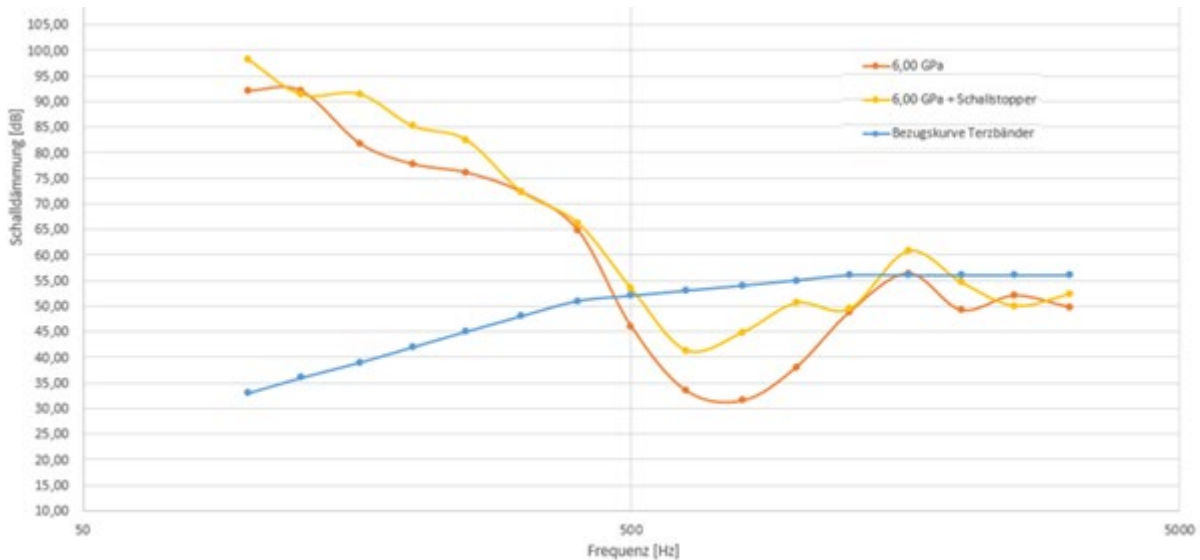


Abbildung 6: Ergebnisse aus FEM-Simulationsberechnungen: Frequenzabhängiges Schall-Dämpfungsverhalten des Ausgangslochbilds (Orange) und nach Einbringen der Schallschutz-Optimierung (Gelb); Bezugskurve für die Umrechnung in das „gewichtete“ Schalldämm-Maß nach DIN EN ISO 717, die berechnete Verbesserung der Schallabsorption beträgt in diesem Fall etwa 6 dB (Blau).

Die schallschutztechnisch optimierte Ziegelgeometrie der „HV-Lochung“ soll aus Gründen der Geheimhaltung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gezeigt werden.

1.1.4 EU-Projekt Horizon 2020 „LightCocoe: Building an ecosystem for the up-scaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures;

Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Werkstofftechnik, M.Eng. C. Allar, K. Oeder, Dr. M.Eng. S. Schmidt und Prof. Dr. W. Krcmar



Das vierjährige EU-Projekt „LightCocoe“ (Projekt Nr.: 814632 – Horizon 2020) startete am 01.01.2019. Im Vorhaben sind insgesamt 24 Projektpartner aus 9 EU-Ländern vernetzt. Dabei geht es um die werkstofftechnische Weiterentwicklung von Leichtbau-Werkstoffen auf allen Gebieten der nichtmetallisch-anorganischen Werk- und Baustoffe.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar ist in den ersten beiden Projektjahren für die gezielte Weiterentwicklung der keramischen Eigenschaften eines Ziegelwerks zuständig. Das Ziel besteht in der Entwicklung neuer Leichtgewicht-Hochlochziegel mit verbesserten werkstofftechnischen Eigenschaften, die durch herkömmliche Extrusion im Ziegelwerk hergestellt werden sollen. Für die Porosierung werden verschiedene organische und anorganische Zuschlagstoffe, u.a. Nano-Porosierungsmittel in Form von Mono- und Mischporosierungen eingesetzt. Darüber hinaus wird die eingesetzte Ton-Mischung künstlich gealtert und dabei plastifiziert mit dem Ziel, die thermische Leitfähigkeit abzusenken. Die Hohlräume innerhalb der Hochlochziegel werden zur Unterdrückung der Wärmeübertragungen durch Strahlung und Konvektion mit Dämmstoffen ausgefüllt. Kommerziell erhältliche Hochlochziegel gemäß dem Stand der Technik zeichnen sich durch Rohdichten unter $0,6 \text{ kg/dm}^3$, Druckfestigkeiten über 6 N/mm^2 und äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $0,07 \text{ W/(mK)}$ aus. Die im Rahmen des Vorhabens neu zu entwickelnden Hochlochziegel sollen bei gleicher Rohdichte und Druckfestigkeit eine verbesserte äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W/(mK)}$ aufweisen, eine extrem ambitionierte Optimierung der Werkstoffeigenschaften. Zurzeit werden umfangreiche Porosierungsversuche mit der Betriebsmischung des Ziegelwerks durchgeführt und Laborziegel hergestellt. Anschließend erfolgt die Bestimmung der keramischen Werkstoffparameter.



Abbildung 7: 50 Teilnehmer aus 9 Ländern der Europäischen Union trafen sich zur 2. Plenarsitzung des EU-Projekts „LightCoce“ im Energie Campus Nürnberg.

Darüber hinaus erfolgt der Aufbau einer Pilotanlage zur Herstellung von Forschungsziegeln im Labor- und Technikums-Maßstab. Die von der Arbeitsgruppe betriebene Pilotanlage wird in der Technikumshalle im Energie Campus Nürnberg aufgebaut und ist in der Lage alle verfahrenstechnischen Schritte der Ziegelherstellung im Labor- bzw. Technikums-Maßstab zu realisieren. Die Ergebnisse können 1:1 in die Großproduktion übertragen werden. In der zweiten Projekthälfte können interessierte Ziegelwerke aus der gesamten Europäischen Union ihre Produktoptimierungen im Energie Campus Nürnberg durchführen lassen. Die Pilotanlage steht der gesamten Ziegelindustrie für Forschungsarbeiten zur Verfügung. Zum jetzigen Zeitpunkt können aus Geheimhaltungsgründen noch keine werkstofftechnischen Ergebnisse bekannt gegeben werden.

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



Das Ziel im dreijährigen EU-Projekt „Hypobrick“ (Projekt-Nummer: LIFE18 CCM/ES/001114) besteht darin, neue, „ungebrannte“ Mauersteine – basierend auf industriellen Reststoffen wie beispielsweise Flugasche, aufbereitete Kunststoffe, Glaspulver, gemahlenen Elektronik-Schrott, Hydroxid-Schlämme sowie gebranntem und gemahlenen Ziegelbruch über die sogenannte Geopolymer-Route (Alkaline Activation Process) herzustellen. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass es sich bei den neuartigen Geopolymer-Steinen um ein kalt erhärtendes Bindebaustoff-System handelt, d.h. die Geopolymer-Mischungen müssen zur Aushärtung nicht gebrannt werden. Mit dem neuen Verfahren soll der Tunnelofen-Brennprozess zur Herstellung keramischer Mauerziegel, der Primärbrennstoffe verbraucht und CO₂-Emissionen verursacht, ersetzt werden. Es handelt es sich um einen chemischen Prozess, bei dem ein pulverförmiges Alumosilikat wie z.B. Flugasche mit einem alkalischen Aktivator gemischt wird, um eine Masse zu erhalten, die innerhalb eines angemessenen kurzen Zeitraums aushärtet. Ein Trocknungsschritt bei moderaten Temperaturen zwischen 60 - 80 °C

unterstützt den Aushärteprozess. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar ist für die Ausarbeitung einer geeigneten Rezeptur sowohl für die Gießformgebung als auch für die Extrusion im Labormaßstab zuständig. Die beteiligten Ziegelwerke übernehmen anschließend die Rezepturen und führen Technikums- bzw. Großversuche in der Produktion durch. Ehrgeiziges Ziel ist die Extrusion der neuartigen Geopolymer-Steine analog der konventionellen Ziegel-Extrusion. Ein Brennprozess analog der Ziegelherstellung findet dabei nicht statt. Das dreijährige EU-Projekt startete am 01.10.2019 und wird von 5 Partnern aus Wissenschaft und Industrie bearbeitet.

In der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar wurden bereits erste Rezepturen getestet und die Gießformgebung eines Formsteins erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse werden im nächsten Jahresbericht vorgestellt. Mit dem neuen Verfahren und der Nutzung industrieller Reststoffe versprechen sich die Projektpartner einen Beitrag zur nachhaltigen Produktion neuartiger Baustoffe unter Einbeziehung der Kreislaufwirtschaft und damit verbunden eine Einsparung von CO₂-Emissionen. Das EU-Projekt erhält Fördermittel aus dem LIFE Programm „Climate Change Mitigation“, in dem Projekte für die Umwelt, den Naturschutz und den Klimaschutz in der gesamten Europäischen Union gefördert werden.

1.1.6 Vom Projektträger abgelehntes Forschungsvorhaben: „Entwicklung und Herstellung neuartiger Geopolymer-Produkte und Recycling-Ziegel aus aufbereitetem und sortenreinem Bauschutt“, Technische Hochschule Nürnberg; Verbundprojekt zwischen den Fakultäten Verfahrenstechnik und Werkstofftechnik, Prof. Dr. Teipel, M.Eng. T. Fehn, M.Eng. F. Kugler und Prof. Dr. W. Krcmar

Die Arbeitsgruppe hat unter der Koordination von Prof. Dr. Teipel (THN, Fakultät Verfahrenstechnik) und von Prof. Dr. Krcmar gemeinsam mit 11 Projektpartnern eine Projektskizze mit dem oben angegebenen Thema erstellt und das Vorhaben als Verbundprojekt im Rahmen der BMBF-Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ beim Fördermittelgeber eingereicht. Leider wurde die Förderung des Vorhabens abgelehnt!



Abbildung 8: LOGO's der Verbundpartner, die sich am abgelehnten Forschungsvorhaben beteiligen wollten.

1.1.7 Strategische Entwicklung in der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik, Prof. Dr. W. Krcmar

Es besteht bereits seit der Förderphase des EnCN 1 die Planung und der Aufbau einer übergeordneten Arbeitsgruppe „**Energieeffiziente Gebäude**“, in der insbesondere vier Professoren der THN mit Ihren Mitarbeitern zusammenarbeiten (Abbildung 14). Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ von Prof. Dr. Krcmar war seinerzeit Gründungsmitglied und ist seitdem integraler Bestandteil dieser Arbeitsgruppe. Zur Unterstützung dieser Arbeitsgruppe hat die THN im Jahr 2019 im 3. OG von Gebäude 16 („Auf AEG“) ein Sekretariat mit Teamassistenz eingerichtet und einen weiteren Mitarbeiter zur übergeordneten Koordination laufender und Beantragung neuer Forschungsvorhaben eingestellt. Das geplante und noch im Aufbau befindliche Konzept verläuft bisher sehr erfolgreich. Die Nachhaltigkeitsstrategie der THN sieht vor, das die übergeordnete Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“ künftig aus den drei Arbeitsgruppen „Energieeffiziente Werkstoffe“ (Prof. Dr. Krcmar), „Energieeffiziente Gebäudetechnik“ (Prof. Dr. Dentel) und „Elektrotechnik“ (Prof. Dr. Kießling) weitergeführt werden soll (Abbildung 24).

1.1.8 Interdisziplinarität

Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ ist sowohl mit Fakultäten der TH Nürnberg vernetzt (Fakultät „Energietechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik“, Fakultät „Maschinenbau/Versorgungstechnik“ und der eigenen Fakultät „Werkstofftechnik“), darüber hinaus besteht eine Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Karl vom Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen (FAU). Ziel der Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Karl ist die Entwicklung eines „Speicherziegels“ der in der Lage ist, thermische Energie dynamisch ein- und wieder auszuspeichern.

Außerdem besteht ein laufendes Forschungsprojekt mit der Freien Universität Berlin, Fakultät Physik sowie eine Zusammenarbeit mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fakultät Geowissenschaften. Mit der letztgenannten Universität finden, neben der fachlichen Zusammenarbeit, auch kooperierende Promotionen statt.

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Schlüter von der Hochschule Ansbach, Prof. Dr. Opferkuch vom Nuremberg Campus of Technology (NCT), mit Prof. Dr. Dietz von der Fakultät EFI der THN und der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar erfolgt z.Zt. die Ausarbeitung eines neuen Forschungsantrags „Abwärmeverstromung bei volatilen Abgasströmen in der energieintensiven Industrie“. Der Forschungsantrag soll beim 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ des BMWi eingereicht werden.

Neu ist die erst kürzlich begonnene Zusammenarbeit mit der europäischen Universität Louvain und Industriebetrieben in Wallonien. Hier ist künftig die Durchführung von EU-Forschungsvorhaben geplant, die sich mit Themen des Klima- und Umweltschutz sowie dem Baustoff-Recycling und der Ressourceneffizienz beschäftigen. Planungsgespräche finden bereits statt.

Seit 2019 besteht eine fachliche Zusammenarbeit zwischen Prof. Dr. Dietz, Prof. Dr. Krcmar und Professoren der internationalen Universität Sancti Spiritus auf Kuba. In Kuba besteht der Wunsch, deutsche Anlagentechnik zur Energieeffizienz und zum Klimaschutz auf Kuba zu installieren. Außerdem ist ein künftiger Austausch von Studierenden zwischen der Universität Sancti Spiritus auf Kuba und der TH Nürnberg geplant. Die künftige Zusammenarbeit wurde bereits mit einem „Letter of Intent“ manifestiert.

1.1.9 Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchs

Doktoranden:

Seit dem Start der EnCN-Förderphase 2 ist die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ von Prof. Dr. Krcmar bis auf insgesamt 8 drittmittelbezahlte Projektmitarbeiter angewachsen. 2 Mitarbeiter haben im Januar 2019 ihre Promotionen in Kooperation mit der Universität Halle-Wittenberg erfolgreich abgeschlossen und ihren beruflichen Werdegang in der Industrie gestartet. Dabei handelte es sich um eine Doktorandin mit dem Promotionsthema „Immobilization mechanisms of lead (II) and zinc (II) ions in fly ash based geopolymers depending on the Na / Al and Si / Al ratio“ und um einen Doktoranden mit dem Promotionsthema: „Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnschichtmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit“. Außerdem wurden 3 weitere Doktoranden aus der Arbeitsgruppe für eine kooperative Promotion an der Universität Halle-Wittenberg eingeschrieben und 3 weitere Promotionskandidaten befinden sich derzeit in der Promotionsfindungsphase.

Studierende:

In der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ sind jährlich ca. 20 Studierende der Fakultät Werkstofftechnik als Wissenschaftliche Hilfskräfte tätig. Die Studierenden werden in die Forschungsprojekte integriert und fertigen mit dem erarbeiteten Wissen entweder Bachelor- oder Master-Arbeiten, Projektarbeiten oder Poster an oder absolvieren ihr Praxissemester bzw. sind als Wiss. Hilfskräfte tätig. Im Jahr 2019 haben 19 Studierende der Fakultät Werkstofftechnik sowie 1 Studentin aus der Hochschule Magdeburg in der Arbeitsgruppe mitgearbeitet, z.B. als Wiss. Hilfskräfte, in Projektarbeiten, im Praxissemester sowie in Bachelor- und Master-Arbeiten. Für Schüler wird in der Arbeitsgruppe ein 1-wöchiges Praktikum angeboten. Darüber hinaus sind zusätzlich jährlich ca. 6 bis 8 Studierende für ähnliche Arbeitsaufgaben bei der Firma CERAMIX AG in Nürnberg tätig, wobei seit 19 Jahren eine enge Zusammenarbeit zwischen der CERAMIX AG und der Arbeitsgruppe bei wissenschaftlichen Fragestellungen besteht.

Seit vielen Jahren findet zweimal jährlich in Zusammenarbeit mit der CERAMIX AG ein Ziegler-Seminar statt. Dabei präsentieren Mitarbeiter von CERAMIX sowie Studierende und Doktoranden der THN im Rahmen von Vorträgen ihre erarbeiteten Ergebnisse vor Repräsentanten aus 30 europäischen Ziegelwerken.

Absolventen haben die Möglichkeit sich im „Absolventen – und Förderverein“ der Fakultät Werkstofftechnik zu organisieren und dadurch den Kontakt und Weiterbildungsangebote zu nutzen.

Ein Doktorand und ein Studierender aus der Arbeitsgruppe haben im Jahr 2019 den „Franken-Schotter-Preis“ für den Werkbericht „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Applikation einer Infrarot-Reflexbeschichtung“ erhalten.

1.1.10 Technologietransfer

Der Technologietransfer erfolgt u.a. durch erfolgreiche Zusammenarbeit mit Forschungspartnern aus Wissenschaft und Industrie. Die Ergebnisse werden in Forschungsberichten, Publikationen, Vorträgen, Postern, Seminaren veröffentlicht und gehen auch in die Vorlesungen und Abschlussarbeiten der Studierenden ein.

1. Verbundprojekt „Herzo Base-Energiespeicherhäuser“:

Eine interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe der Professoren Dr. Kießling (Fakultät EFI), Dr. Dentel (Fakultät MB/VS) und Dr. Krcmar (Fakultät WT) hat im Rahmen eines 3-jährigen Verbundprojekts in den Jahren 2015 bis 2019 zusammen mit zahlreichen Industriebetrieben einen 8-spännigen Reihenhauskomplex, die „Herzo Base Energiespeicherhäuser“ mit Partnern geplant und gebaut. Dabei wurde die beste Wärmedämmung der Welt, nämlich mit CALOSTAT (=pyrogene Kieselsäure mit Glasfasern von Evonik) verfüllte Poroton-Ziegel verbaut und eine zukunftsweisende technische Gebäudeausrüstung mit regenerativer Energieerzeugung, Batterie- und thermischem Speicher sowie prädiktiver Betriebsführung realisiert. Im Rahmen eines Kurzzeit-Monitorings wurde der energetische Standard KfW 40 Plus ermittelt. Alle 8 Reihenhäuser wurden inzwischen verkauft und werden von Familien bewohnt. Die schadstofffreie Innenraum-Luftqualität der Häuser wurde vom TÜV-Süd überprüft. Die Gebäude sind Sentinel-zertifiziert; sogar Allergiker können die Gebäude bewohnen.

Es handelt sich um das bisher größte EnCN-Projekt bei dem Technologietransfer aus dem EnCN in die Bauindustrie umgesetzt wurde. Der Finanzeinsatz zur Realisierung der Energiespeicherhäuser betrug ca. 4,4 Mio €.

2. Verbundprojekt „Herzo Opt“:

Bei dem Projekt „Herzo Opt“ handelt es sich um ein Folgeprojekt der „Herzo Base-Energiespeicherhäuser“. Dabei werden über einen Zeitraum von 3 Jahren energieeffiziente Gebäudedaten aus den Gebäudehüllen sowie der Technischen Gebäudeausrüstung aufgenommen und ausgewertet. Ziel ist die weitere Energieeffizienz-Optimierung der Betriebsweise der 8 Reihenhäuser. Die Ergebnisse werden im Rahmen des Technologietransfers der beteiligten Bauindustrie und der beteiligten Arbeitsgruppe Agenda 21 in Herzogenaurach zur Verfügung gestellt und können für künftige Bauvorhaben genutzt werden.

3. Forschungsplattform „Innovationszirkel Hintermauerziegel-Industrie“

Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ arbeitet seit vielen Jahren bei F&E-Projekten mit der CERAMIX AG, Nürnberg zusammen. Auf der CERAMIX-internen Forschungsplattform „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ sind 30 europäische Mauerziegelwerke organisiert und führen gemeinsam Forschungsarbeiten durch. Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ ist Gründungsmitglied dieser Forschungsplattform und integrierter Forschungspartner der beteiligten Industriebetriebe. Zweimal jährlich finden ganztägige Workshops, die inzwischen legendären „Ziegler-Seminare“ im EnCN statt, wobei jeweils die neu erarbeiteten Forschungsergebnisse den Ziegelwerken mitgeteilt werden. Dadurch werden neue Erkenntnisse direkt und zeitnah in die Industrie transferiert.

4. Internationaler Technologietransfer - „Klima- und Umweltschutz auf Kuba (Karibik)“:

Im Rahmen eines Kuba-Effizienz-Workshops in Berlin und an der Universität Sancti Spiritus auf Kuba erfolgte in Zusammenarbeit mit Repräsentanten aus Kuba und den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Dietz und Prof. Dr. Krcmar die Vorbesprechung zu drei musterhaften Forschungsprojekten, mit dem Ziel die Energieeffizienz auf Kuba zu erhöhen, den

CO₂-Ausstoß zu mindern und den Klima- und Umweltschutz mit Wissen aus dem EnCN und mit deutscher Technik voranzubringen:

1. Bau eines modernen, energieeffizienten Mauerziegelwerks nach deutschem Standard für 250 t/Ziegel pro Tag
2. Bau eines Null-Energie-Musterhauses nach EnCN-Standard als Beispiel für die Bauindustrie auf Kuba
3. Energieeffizienz-Sanierung der passiven und aktiven Komponenten eines Bestandsgebäudes der Universität Sancti Spiritus auf Kuba nach EnCN-Standards als Beispiel für die Bauindustrie auf Kuba

In einem ersten Schritt ist die Realisierung eines modernen, energieeffizienten Ziegelwerks auf Kuba geplant. Dazu wurde inzwischen eine Arbeitsgruppe bestehend aus Repräsentanten aus Kuba, deutschen Anlagebauern, Prof. Dr. Krcmar und Prof. Dr. Dietz installiert. Die Planungen laufen bereits. Im Juni 2020 ist ein zugehöriger Workshop mit einer hochrangig besetzten Delegation aus Kuba im EnCN geplant. Dabei erfolgt die Besichtigung moderner deutscher Ziegelwerke sowie Planungsgespräche mit deutschen Anlagenbauern. Ziel ist die Steigerung des Klimaschutzes auf Kuba durch den Export deutscher Energieeffizienztechnik.

5. Internationaler Technologietransfer - „Klima- und Umweltschutz auf den ABC-Inseln (Karibik)“:

Im Rahmen einer Delegationsreise hat sich Prof. Dr. Krcmar u.a. mit Möglichkeiten zum Bau von Energieeffizienz-Häusern nach deutschem Muster auf den ABC-Inseln beschäftigt. In einer Musterhaus-Siedlung mit Niedrigenergiehäusern in Oranjestad (Aruba) soll ein EnCN-Energieeffizienz-Haus („Deutsches Haus“), mit geeigneter Wärmedämmung, regenerativer Energiegewinnung und Speicher als Musterhaus für die Bauindustrie aufgebaut werden. Begründung: Im Außenbereich der Häuser herrschen Temperaturen von ca. 35 °C, während im Inneren der Gebäude durch elektrisch betriebene Kälteaggregate eine Temperatur von ca. 21 °C eingestellt wird. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von 14 K. Damit kehrt sich der Wärmestrom gegenüber den Verhältnissen in Deutschland um. Der Wärmestrom verläuft in seiner Richtung nicht von innen nach außen, sondern von außen nach innen. Der zum Betrieb der Kälteaggregate benötigte Strom wird durch Verbrennung von Erdöl bewerkstelligt mit entsprechenden CO₂-Emissionen. Eine geeignete, minimalinvasive Wärmedämmung würde den Wärmestrom von außen nach innen drastisch reduzieren, so dass der Stromverbrauch sinken und unnötige CO₂-Emissionen zur Stromherstellung aus Erdöl unterbleiben würden. Mögliche Projekte wurden bereits in Vorgesprächen mit Repräsentanten aus Industrie und Regierung geführt, u.a. mit der Premierministerin und der deutschen Konsulin auf Aruba. Ziel ist die Steigerung des Klimaschutzes auf den ABC-Inseln durch den Exporttransfer deutscher Energieeffizienztechnik.

1.1.11 Ausblick

Die sehr erfolgreich agierende Arbeitsgruppe hat für die Finanzierung künftiger Forschungsarbeiten bereits neue Forschungsanträge bei Projektträger-Institutionen eingereicht:

1. „Wirbelsinter-Ofen“:

Für den nächsten Berichtszeitraum 2020 konnte bei der Staedtler-Stiftung das mit 40.000 € dotierte Projekt „Fertigstellung und Versuchsbetrieb eines gasbefeuerten Wirbelschicht-Sinterofens für keramische Elektronikbauteile kleinster Abmessungen“ erfolgreich eingeworben werden. Das Projekt startet in 2020.

2. Neuantrag „Recycling-Ziegel“:

Darüber hinaus wurde in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Teipel aus der Fakultät Verfahrenstechnik der TH Nürnberg und Industriebetrieben eine neue Projektskizze mit dem Titel „Entwicklung neuartiger Recycling-Ziegel mit sehr guten Dämmstoffeigenschaften für die Baustoffindustrie aus aufbereiteten Bau-Reststoffen“ beim Projektträger der Forschungsförderung „Zukunft Bau“ eingereicht. Eine Entscheidung wird im Juni 2020 erwartet.

3. Neuantrag „ThermoPower“:

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Schlüter von der HS Ansbach und Prof. Dr. Opferkuch vom Nuremberg Campus of Technology (NCT-THN) sowie Prof. Dr. Dietz (THN) und Prof. Dr. Krcmar (THN) erfolgt derzeit die Ausarbeitung eines neuen Forschungsantrags mit dem Thema „ThermoPower – Abwärmeverstromung volatiler Abgasströme in der energieintensiven Industrie“. Dabei soll überschüssige Abwärme aus thermischen Prozessen in elektrische Energie

gewandelt werden. Das Vorhaben soll im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ eingereicht werden. Projektleiter ist Prof. Dr. Schlüter von der Hochschule Ansbach.

4. Neuantrag „Häuser Drucken“:

Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ von Prof. Dr. Krcmar arbeitet derzeit in Zusammenarbeit mit dem Ideengeber und Konstrukteur eines mobilen 3D-Druckers sowie Akteuren aus Wissenschaft und Industrie sowie einem Investor an der Ausarbeitung einer Projektskizze mit dem Titel **„Häuser drucken - Additive Fertigung von Gebäuden mittels dem mobilem 3D-Drucker ACR“**. Das Ziel besteht im Aufbau und der Erprobung eines mobilen 3D-Druckers für die additive Fertigung von Gebäuden und der Entwicklung der zugehörigen Bindebaustoffe.

5. Weiterentwicklung „Gipsschaum“:

In Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Gipsschaum-Polyurethan-Schallschutz-Elementen für Innenräume und der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dentel, soll eine neue, unbrennbare Schaummischung entwickelt und zu Schallschutz-Elementen verarbeitet werden. Dazu finden momentan Abstimmungsgespräche statt. Ziel ist die Einreichung von mindestens einem neuen Forschungsantrag.

6. Neuartige „Ziegel Trocknung“:

In Zusammenarbeit mit einem deutschen Anlagenbauer kompletter Ziegelwerke sowie der CERAMIX AG, Nürnberg und dem Innovationszirkel der CERAMIX AG mit immerhin 30 europäischen Mauerziegelwerken soll ein neuartiges Trocknungsverfahren, nämlich die Kontakttrocknung für pressfeuchte Ziegelrohlinge (Wassergehalt 21 %) erprobt werden. Laboruntersuchungen aus einem Vorgängerprojekt führten zu drastisch verkürzten Trocknungszeiten, wenn zu Beginn der Trocknung der pressfeuchte Ziegelrohling in direkten Kontakt mit einem geeigneten Trocknungsmittel steht.

1.1.12 Patente

Es wurden die Offenlegungsschriften für ein deutsches Patent und ein Weltpatent veröffentlicht. Über die jetzt anstehende Durchführung von Patentprüfungsverfahren erfolgt derzeit THN-intern eine Abstimmung (siehe Patentliste).

1.1.13 Spin off – Ceramix AG, Nürnberg

Prof. Dr. Krcmar hat bereits im Dezember 2000 die CERAMIX AG in Nürnberg gemeinsam mit 2 Absolventen der Fakultät Werkstofftechnik gegründet. Es handelt sich um ein Ingenieurbüro mit jetzt 4 Absolventen der TH Nürnberg als Mitarbeiter und eigenen Laborräumen. Die CERAMIX AG führt die Eigenüberwachung, das CO₂-Monitoring sowie F&E-Arbeiten für die deutsche und europäische Ziegelindustrie durch. Es besteht seit 19 Jahren eine enge Zusammenarbeit zwischen der CERAMIX AG und der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“. Die erfolgreiche Gründung der CERAMIX AG kann als Spin off angesehen werden.

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 und M.Eng. Matthias Braun

Bei architektonischer Unterteilung einer Fassade in festgelegte Bereiche (Zimmer, Etagen, Fensterachsen) führt die Bestückung mit Photovoltaik zu vielen dezentralen Energieerzeugern kleiner Leistung. Für deren Integration müssen verschiedene Stromversorgungskonzepte entwickelt werden. Ein erster Versuchsstand, der eine elektrisch aktive Fassade mit gedruckter organischer Photovoltaik (OPV) darstellen soll, wurde bereits im Jahr 2018 entwickelt und aufgebaut. Der bisherige Aufbau besteht aus einem PV-Generator, einem Solarladeregler, einem Akkumulator als Energiespeicher und einem elektrischen Verbraucher. Zur Erfassung von Strom- und Spannungswerten in den einzelnen Stromkreisen wurde ein Micro-Controller (Funduino) eingesetzt. Dieser greift mittels Spannungsteilerschaltung die einzelnen Spannungen direkt ab, während für die Strommessung Hall-Sensoren eingesetzt werden. Die Messwerte werden auf einer Speicherkarte abgelegt.

Der in dieser Form vorhandene Versuchsaufbau wurde im Berichtsjahr 2019 erweitert und verbessert. Zusätzlich zum bereits vorhandenen Messsystem wurde der Versuch um einen Einplatinen-PC (Raspberry Pi) ergänzt. Die darauf implementierte grafische Benutzeroberfläche erlaubt es nun verschiedene Visualisierungen und Auswertungen der Messdaten direkt im laufenden Betrieb abzurufen. Der Versuch muss nicht mehr zur Entnahme der Speicherkarte unterbrochen werden. Außerdem wurde in dem Messaufbau ein Pyranometer integriert, das nun die tatsächlich vor Ort vorhandene Strahlungsleistung der Sonne erfasst.

Im Lauf des Projektjahres 2019 wurden Fläche und Leistung der im Versuch eingesetzten organischen Photovoltaik sukzessive gesteigert. Das ZAE Bayern lieferte als Projektpartner hierfür die benötigten OPV Module in den entsprechenden Abmessungen. Während in einem Erstversuch nur einzelne OPV-Module im Kleinformat verschaltet wurden, konnte die aktive Modulfläche zunächst auf 0,5 m² und später auf 4 m² erhöht werden. Dazu stellte das ZAE 24 OPV-Module in Streifenform her. Diese wurden in sechs parallele Strings mit je vier seriell verschalteten Modulen gegliedert. Aufgrund negativer Erfahrungen bei Verschattung einzelner Zellen von mehreren in Reihe verschalteter OPV Elemente, wurde für den sicheren Betrieb des Versuchs eine Verschaltungsplatine entworfen, die mit Bypassdioden, Stringdioden und Sicherungen bestückt ist. Der vorhandene Solarladeregler betreibt den PV Generator möglichst in seinem besten Arbeitspunkt (MPP) und speist die erzeugte Energie in einen 24 V Akku ein. Im 24 V DC Netz des Versuchsaufbaus befinden sich auch eine mehrstufige Lampenkaskade und ein Raumlüftungsgerät mit denen der Energieverbrauch für die Beleuchtung und Belüftung eines Büroraumes praxisnah simuliert werden kann. Diese Verbraucher können auch per Fernzugriff über die Bedienoberfläche des Einplatinencomputers zu- und weggeschaltet werden.



Abbildung 9: Die Fläche und Leistung der eingesetzten OPV hat sich im Laufe des Versuchs sukzessive erhöht.



Abbildung 10: Montageplatte mit den elektronischen Komponenten des Versuchsaufbaus (links). Verschaltungsplatine mit Dioden und Sicherungen (rechts).

Für den Aufbau des Versuchsstandes in dieser Größenordnung konnte ein zur Verfügung gestelltes Fenster im Labor für elektrische Maschinen der TH-Nürnberg am Kesslerplatz genutzt werden. Der einfacheren Handhabung wegen werden die Module an der Innenseite der Fensterscheibe aufgeklebt und im Freien an der Außenmauer angebracht. Mittels des implementierten Fernzugriffes, können der Betriebszustand und die Messdaten des Experiments jederzeit über eine Internetverbindung eingesehen werden. Der Versuch befindet sich in seiner jetzigen Ausbauform seit August 2019 im Dauerbetrieb und läuft weitgehend störungsfrei.

Im Vorfeld der Inbetriebnahme wurden zur genaueren Charakterisierung der 24 OPV Module Messversuche für die Ermittlung der Strom-Spannungskennlinie unternommen. Dazu konnte auf die professionelle Laborausstattung des Labors für Sensortechnik der TH-Nürnberg zurückgegriffen werden. Dort konnten die Module unter einem Sonnensimulator mit einem Kennlinienmessgerät vermessen werden. Es ist geplant, diese Messungen im Jahr 2020 nach einer Betriebsphase von ca. einem halben Jahr zu wiederholen, um Verhaltensveränderungen bzw. Alterungserscheinungen der Module festzustellen.

Der Versuchsstand wird auch in 2020 weiter betrieben, um mit der Auswertung der Messdaten weitere Erfahrungen und Erkenntnisse im Umgang mit organisch gedruckter Photovoltaik zu erhalten. Der Aufbau soll dazu hinsichtlich Anordnung, Verschaltung und Verkabelung der OPV-Module noch weiter optimiert werden.

Die beim Betrieb des Versuchstandes erhaltenen Ergebnisse fließen auch in das Projekt Fassade³ mit ein, das ebenfalls am EnCN bearbeitet wird und sich mit dem Einsatz von organisch gedruckter Photovoltaik in Gebäudefassaden befasst.

1.2.2 Konstruktive Entwicklung und bauphysikalische Bewertung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden;

Fraunhofer-Institut für Baustoffphysik (IBP) und TH Nürnberg – Fakultät Maschinenbau / Versorgungstechnik, Prof. Dr. Gunnar Grün

Die Mehrzahl der Gebäude in Deutschland, aber auch in Europa, befindet sich mittlerweile in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Im Rahmen der anstehenden Sanierungsmaßnahmen bietet die Aktivierung der Gebäudehülle mit Photovoltaik (PV) in Kombination mit Wärmedämmung die Chance, eine lokale Stromerzeugung in solchen Gebäuden zu erschließen. Häufig verhindern vermeintlich hohe Investitionskosten und Unsicherheiten im Planungsprozess (Brandschutz, Baurecht, Bauphysik, Statik) den Einsatz von PV-Fassaden, weshalb hier für die Technikfassade PV-Module als primäre energieadaptive Komponente für die Integration gewählt werden. Ziel ist es, die PV-Elemente so in ein Fassadensystem zu integrieren, dass sie industriell gebrauchsfertig und hochpräzise produziert und schließlich an der Fassade eingehängt werden können. Eine solche Fassadenkonstruktion wurde u.a. basierend auf den bereits in diesem AP durchgeführten konstruktiven Entwicklungen im Rahmen des Projektes PV-HoWoSan aufgebaut und einem Brandversuch unterzogen. Die daraus resultierenden Messergebnisse wurden anschließend hier 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 Ankern angeschlossen und mit diesen verschraubt. Die Befestigung der Anker an der Wand erfolgt mittels zweier 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 befestigtem Brandriegel simuliert. Die Abmessungen sowie die angenommenen Kennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften einzelner Bestandteile der Ankerkonstruktion und des Brandriegels.

Bezeichnung	Werkstoff -	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Rohdichte kg/m ³	spez. Wärmekapazität J/kgK
Gewindestange	Stahl	50,0 ¹⁾	7800	450 ¹⁾
Ankerplatte	Stahl	50,0 ¹⁾	7800	450 ¹⁾
Gewindestange mit Gewindehülse	Edelstahl	15,0 ²⁾	7900	500 ²⁾
Calciumsilikatplatten	Calciumsilikat	0,066 ³⁾	225	1000
U-Profil (Anker)	Edelstahl	15,0 ²⁾	7900	500 ²⁾
U-Profil (Brandriegel)	Edelstahl	15,0 ²⁾	7900	500 ²⁾
Füllung Brandriegel	Steinwolle	0,034 ⁴⁾	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 (Abbildung 11). 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.

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.

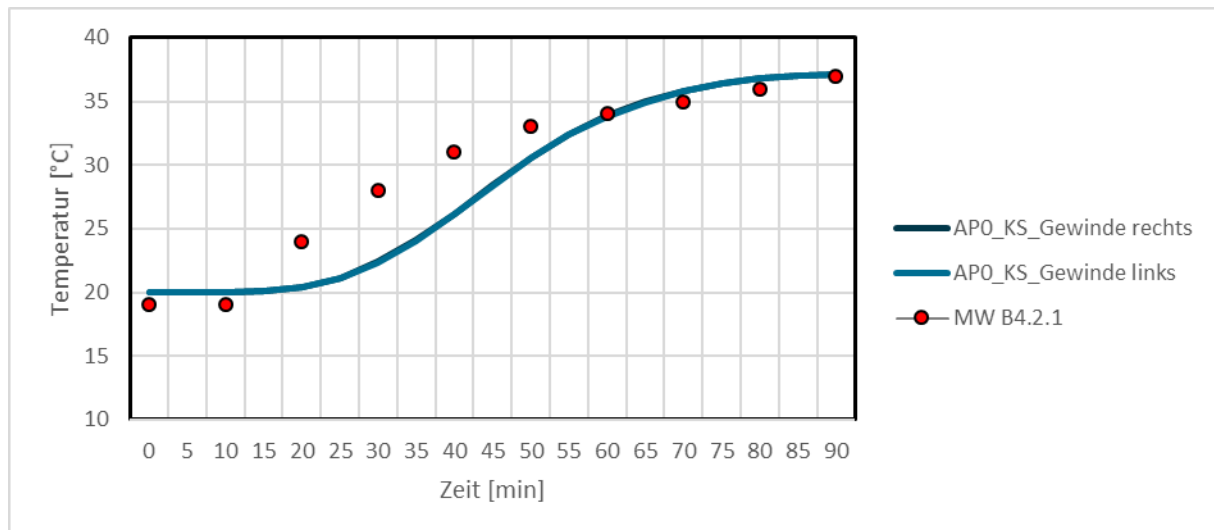


Abbildung 11: Vergleich des Temperatur-Zeit-Verhaltens der gemessenen Werte an einer äußeren Gewindestange 3 cm in der Kalksandsteinwand aus dem Brandversuch mit den simulierten Werten jeweils an der linken und der rechten Gewindestange.

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

Einleitung und Motivation

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

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

1.2.3.1 „Fassade³ – effizient – aktiv – modular: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad“;

Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Arno Dentel, Prof. Dr. Günter Kießling, M.Sc. Susanna Bordin, und M.A. Marcel Neberich

Gegenstand des interdisziplinären Verbundvorhabens „Fassade³“ sind die Entwicklung und Demonstration eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad. Das innovative Konzept umfasst Montagesystem, Wärmedämmung, beweglichen Sonnenschutz inklusive energieoptimierter Regelung sowie Stromerzeugung durch PV.

Das in der zweiten Förderphase des EnCN durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) bewilligte Forschungsprojekt wird durch die TH Nürnberg koordiniert und innerhalb eines Verbunds aus Hochschule, Forschungseinrichtungen und mittelständischen Unternehmen bearbeitet. Insbesondere die Zusammenarbeit und der fachliche Austausch mit dem ZAE Bayern erweisen sich, begünstigt durch den gemeinsamen Standort am EnCN, als sehr positiv. Das Projekt ist in drei Phasen gegliedert: Eine Entwicklungs- und Planungsphase (2018 und 2019), auf die eine Umsetzungsphase und eine Intensivmonitoringphase im Jahr 2020 folgen.

Im zweiten Projektjahr wurde das Konzept für das modulare Fassadenelement finalisiert. Abbildung 12 zeigt einen Schnitt des Fassadenelements. Dieses wird mittels organischer Photovoltaik (OPV) Strom erzeugen. Die OPV-Module befinden sich sowohl in opaken Bereichen der Fassade als auch in einem horizontalen Sonnenschutz aus Glas. Die mit OPV-Modulen bestückten Fassadenplatten werden von der OPVIUS GmbH hergestellt. Das gestalterische und elektrische Design für den OPV-Sonnenschutz wurde gemeinsam mit dem ZAE Bayern und der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kießling (EFFIZIENZ) entworfen. Die in den Sonnenschutz integrierten, transparenten OPV-Module werden vom ZAE Bayern entwickelt und in der Solarfabrik der Zukunft am EnCN hergestellt. Des Weiteren sind in das Fassadenelement ein selektiv beschichteter Sonnenschutzbehang und ein nachhaltiger Dämmstoff integriert. Die Entwicklungsarbeiten zum Dämmstoff durch die B.A.M. GmbH sind abgeschlossen. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Krcmar (EFFIZIENZ) wurde die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Probekörper aus nachhaltigen Rohstoffen bestimmt. Für eine breite Anwendbarkeit des Dämmstoffs im Bauwesen wird die Brandschutzklasse B1 angestrebt. Um dies zu erreichen, wurde auf einen mineralorganischen Schaum gewechselt, der aus bis zu 60 % Regenerat besteht (Gips, der in der Abgasreinigung in Kraftwerken anfällt). Die Wärmeleitfähigkeit des Schaums ist mit einem λ -Wert in Höhe von 0,039 W/mK vergleichbar mit konventionellen im Bauwesen eingesetzten Dämmmaterialien. Die Arbeiten zur selektiven Beschichtung des textilen Sonnenschutzbehangs durch das Hohenstein Institut für Textilinnovation GmbH wurden ebenfalls fertiggestellt.

Nach Abschluss der Komponentenentwicklung wurden die einzelnen Komponenten in einem Architekturseminar Studenten der TH Nürnberg vorgestellt. Zur modellprädiktiven Regelung des Sonnenschutzbehangs (und auch der Heizung) wurde ein Widerstands-Kapazitäten-Raummodell entwickelt, bei dem die erforderlichen Parameter anhand von Mess- oder Simulationsdaten bestimmt werden. Im letzten Projektjahr (2020) wird auf Basis von Modellen eine prädiktive Regelungsstrategie entworfen. Als Eingabewerte dienen Daten aus einer Wetterprognose (solare Einstrahlung und Außentemperatur). Ziel der Regelung ist die Gewährleistung des thermischen und visuellen Komforts für den Nutzer bei einem möglichst geringen Energieverbrauch für die Beheizung.

Mitte des Jahres 2020 soll die Elementfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude im INNOPARK Kitzingen demonstriert und in einem Monitoring begleitet werden. Um einen funktionalen Abschluss der zu modernisierenden Fassade zu erhalten, wurden drei Fassadenelementtypen entwickelt (Abbildung 13). Zur Erprobung der Montage der Fassadenelemente sowie der mechanischen und der elektrischen Kopplung zweier Fassadenelemente wird zuvor eine Testfassade (Mock-up) erstellt. Im ersten Quartal 2020 werden hierzu jeweils ein Fassadenelement des Typs 2 und des Typs 3 errichtet. Für das wissenschaftliche Monitoring der Demonstrationsfassade wurde gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kießling, dem ZAE Bayern und der ACX GmbH ein Messtechnikkonzept erstellt, das die Erfassung der elektrischen und thermischen Energien sowie die Aufzeichnung von Temperaturverläufen in der Elementfassade beinhaltet. Zusätzlich sind Messungen der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Helligkeit in den an die Fassade angrenzenden Räumen geplant. Abschließend soll der Einfluss der entwickelten Fassade auf die Energiebilanz einzelner Räume sowie auf deren Raumklima in einem Vergleich mit nicht sanierten Räumen untersucht und bewertet werden.

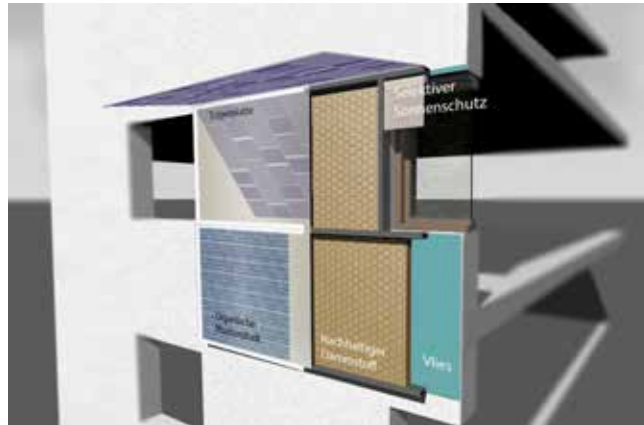


Abbildung 12: Konzept eines aktiven Fassadenelementes mit horizontalem OPV-Sonnenschutz (Fassade³)

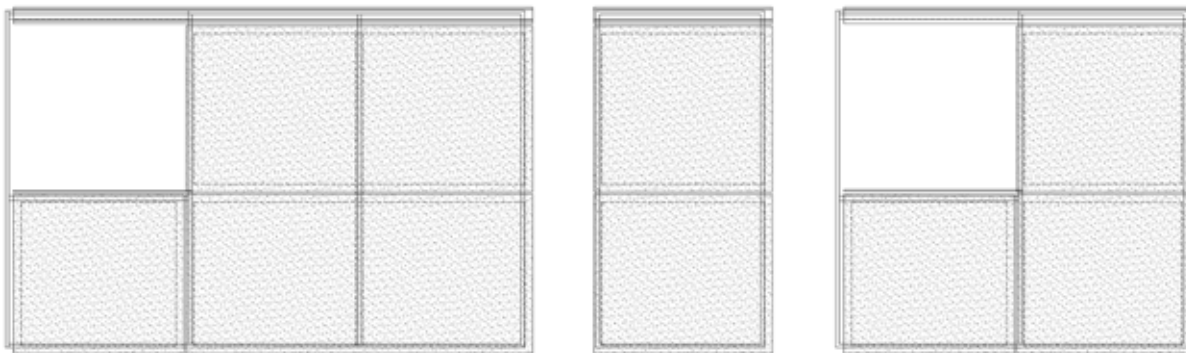


Abbildung 13: Fassadenelement Typen. Zeichnung: a..t..f architektur technik fassade GbR

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. Krcmar

Die Reduktion von klimaschädlichen Treibhausgasen ist eine wesentliche Maßnahme, um dem Klimawandel 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 ca. 35 % der Endenergie für den Gebäudebetrieb aufgewendet werden. Somit stellen energieeffiziente Gebäude eine wichtige Säule der Energiewende dar.

Im Rahmen des o.g. Förderprogramms hat sich am EnCN ein interdisziplinäres Forscherteam der Technischen Hochschule Nürnberg 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 sowie Werkstofftechnik). Dadurch werden interdisziplinäre Kompetenzen aus dem Bereich der Gebäudetechnik, der Elektrotechnik, der Bauphysik und der Werkstofftechnik gebündelt (Abbildung 14).

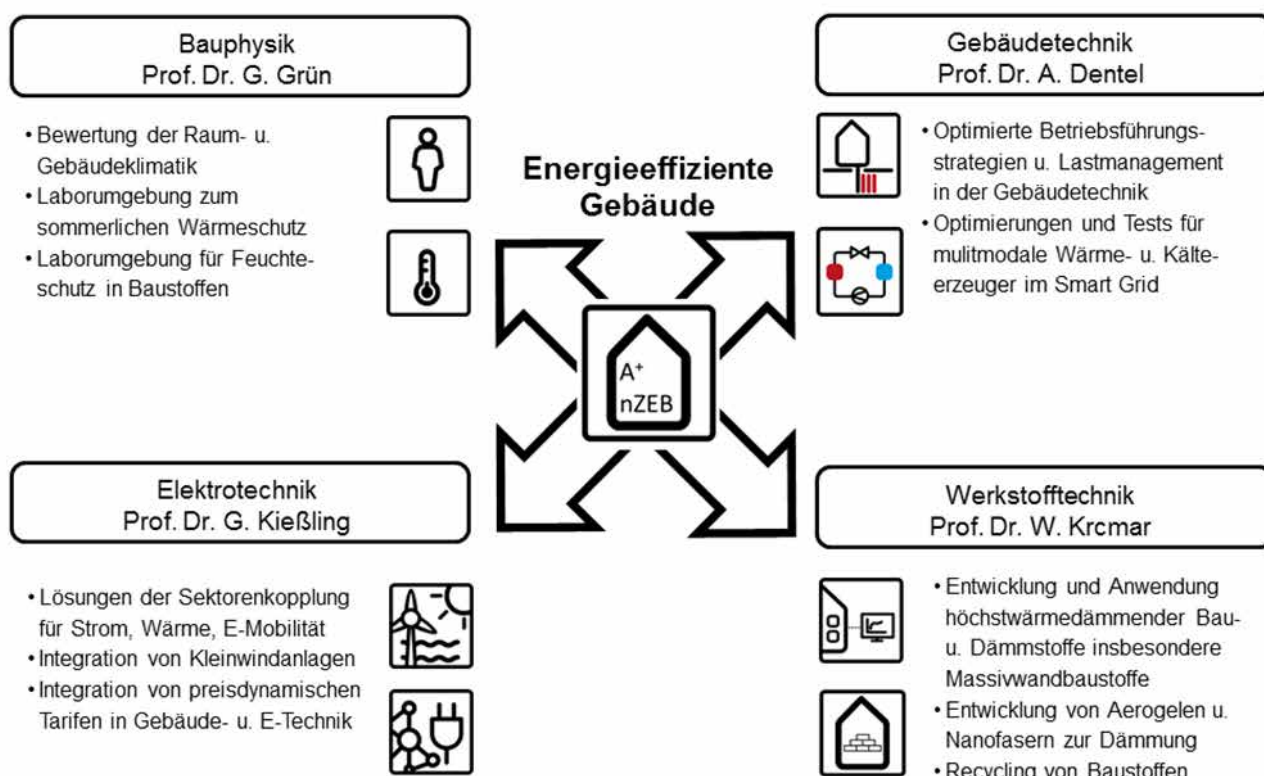


Abbildung 14: Interdisziplinäres Forscherteam und inhaltliche Schwerpunkte des Forschungsschwerpunkts „Energieeffiziente Gebäude“.

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

Im Rahmen der Programmsäule „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ des Landesprogramms wird ein bestehender Wärmepumpenprüfstand im THN-Technikum Rednitzhembach um eine Klimakammer erweitert. Mit dieser soll die Emulation beliebiger Klimata innerhalb des 50 m³ großen Prüfraumes ermöglicht werden. Die Luft des Prüfraums wird hierzu im Umluftbetrieb mithilfe aller vier thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen (Kühlen, Erwärmen, Befeuchten und Entfeuchten) konditioniert.

Die Klimakammer, in Verbindung mit dem HiL-Prüfstand, dient primär der Prüfung von luftgekühlten Wärmepumpen (Luft-Wasser-Wärmepumpen) nach gültigen Prüfnormen (u.a. DIN EN 14511). Die Klimakammer ist dabei Wärmesenke oder -quelle für die Wärmepumpe. Die Wärmepumpe wiederum ist Bestandteil des Gesamtsystems (Gebäude, Versorgungstechnik, Regelung). Dem Gesamtsystem (der Wärmepumpe als Wärme-/Kälteerzeuger) können nun über die Klimakammer nahezu reale, variable (statische oder transiente) Umgebungs- und Betriebsbedingungen vorgegeben werden. Die Luft in der Klimakammer kann in einem Temperaturbereich von -25 °C bis +40 °C bei gleichzeitig definierter Luftfeuchtigkeit im Bereich 10 bis 95 % relativer Feuchte geregelt werden und dies bei hohen Leistungen (z.B. 25 kW), entsprechend den Betriebsdaten der Wärmepumpe. Neben Wärmepumpen können auch Klimageräte oder auch

Elemente wie Heizkörper, Fußbodenheizungen sowie deren Regelungssysteme untersucht werden. Auch bauphysikalische Untersuchungen von Probekörpern (Baustoffe, Bauteile) sind denkbar.

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

Gerade in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) ist bisher das Bewusstsein über Energieeinsparmöglichkeiten noch wenig ausgeprägt und Potenziale zur Effizienzsteigerung und Energiekostensenkung werden nicht ausgeschöpft. Eine Studie des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) aus dem Jahr 2013 beziffert die bis 2020 erreichbaren Energiekostenersparnisse durch Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in der mittelständischen Wirtschaft Deutschlands mit knapp einer Milliarde Euro pro Jahr¹. Energieeffizienz trägt zudem zu einer Verringerung des CO₂-Fußabdrucks und einer Steigerung der Umweltfreundlichkeit der Unternehmen bei.

Ziel des Forschungsprojekts ist die Entwicklung einer modularen und damit kostengünstigen Energiemanagementlösung für kleine und mittlere Unternehmen als Grundvoraussetzung im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation. Alle Ebenen des Energiemanagements – von der Datenerfassung über die -verarbeitung bis hin zur Bedien- und Beobachtungsebene – sollen innerhalb des Projekts auf den Bedarf kleiner und mittlerer Unternehmen angepasst und anhand eines Praxisbeispiels die erfolgreiche Durchführung demonstriert werden. Mit Hilfe dieses Projekts soll kleineren Unternehmen die Möglichkeit gegeben werden, die vorhandenen Logistik-, Produktions- und Energiedaten sinnvoll in einem System zu vernetzen, umfassend zu bewerten und die notwendigen Maßnahmen zur Erschließung von Energiesparpotenzialen selbst einzuleiten. Die zu entwickelnde Energy Intelligence Lösung wird das Unternehmen bei der Umsetzung eines Energiemanagementsystems nach ISO 50001 unterstützen und zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess anleiten. Das Tool wird letztendlich den kleinen und mittleren Unternehmen helfen, energieeffizient, transparent, umweltfreundlich und nachhaltig zu werden.

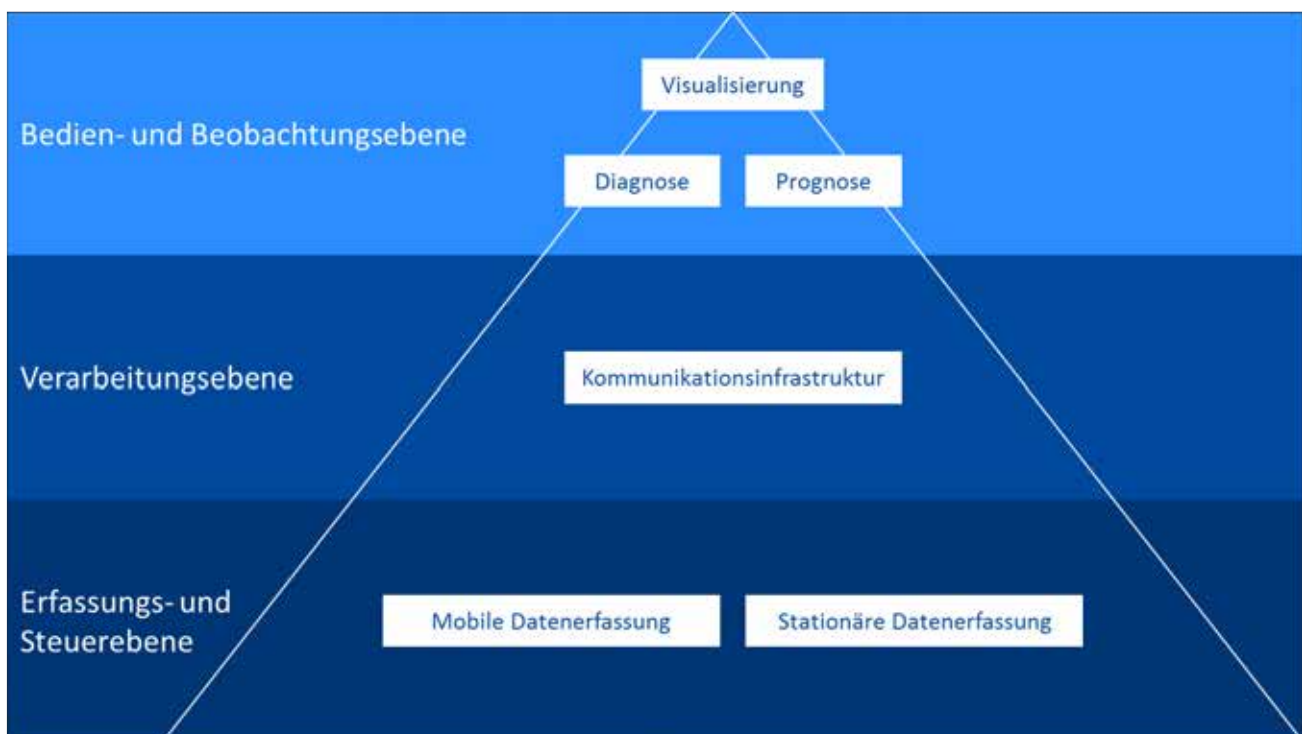


Abbildung 15: KMU^{plus} Energy Intelligence Modell

¹ IREES: „Energiebedarf und wirtschaftliche Energieeffizienz-Potentiale in der mittelständischen Wirtschaft Deutschlands bis 2020 sowie ihre gesamtwirtschaftlichen Wirkungen“, Karlsruhe / Berlin, 19.12.2013, S. I.

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. M. Braun, M.Eng. F. Kugler und Prof. Dr. W. Krcmar

Das dreijährige Forschungsvorhaben „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ (FKZ 03ET1364A) startete im Dezember 2015 im Rahmen der Forschungsinitiative „EnOB“-Energieoptimiertes Bauen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und wurde im Jahr 2019 beendet. Auf der ehemaligen Militärbasis Herzo Base, einem Stadtteil von Herzogenaurach, wurde ein Komplex mit acht Reihenhäusern errichtet, die Ende 2017 bezogen wurden. Jede Einheit verfügt über 5 Zimmer mit einer Wohnfläche von 155 m², zwei Kellerräumen, einer Garage und einem Carport. Die Energiespeicherhäuser haben eine positive Jahresenergiebilanz und übersteigen den KfW-Effizienzhaus-Standard 40 Plus gemäß der EnEV 2016 bei weitem. Am Projekt beteiligt sind die Technische Hochschule Nürnberg, der Energie Campus Nürnberg, die Stadt Herzogenaurach, die Agenda 21 Herzogenaurach, die Raab Baugesellschaft und mehrere Industriepartner.

Ziel des bundesweit einzigartigen Demonstrationsprojektes ist es, eine deutliche Senkung des Primärenergiebedarfs bei Wohnhäusern zu erreichen und technologische Innovationen und zukunftsfähige Konzepte in der Praxis zu erproben. Die Planung und Umsetzung konzentrierte sich sowohl auf die passiven Gebäudekomponenten, hier besonders auf die Wärmedämmung der Gebäudehülle, als auch auf die aktiven Komponenten der Energieerzeugung und –speicherung sowie prädiktiven Betriebsführung.

1.3.1 Gebäudehülle: Monitoring der Wandbaustoffe

Um verschiedene Dämmsysteme miteinander vergleichen zu können, wurden die Gebäudehüllen unterschiedlich konzipiert: Vier der acht Häuser besitzen dem Stand der Technik entsprechende Außenwände aus perlitgefüllten Poroton-Ziegeln. Bei den übrigen vier Häusern wurde eine zweischalige Bauweise umgesetzt: Die innere, tragende Wand besteht aus perlitgefüllten Poroton-Ziegeln der Wandstärke 30 cm. Die äußere Gebäudehülle besteht aus einer sogenannten Wärmedämmfassade, nämlich aus 12 Zentimeter breiten Poroton-Ziegeln mit einer Füllung aus CALOSTAT. Dieser unbrennbare und diffusionsoffene Dämmstoff aus pyrogener Kieselsäure und Glasfasern zeichnet sich durch eine Wärmeleitfähigkeit von nur $\lambda = 0,019 \text{ W/(mK)}$ aus.



Abbildung 16: Rohbau der Herzo Base Energiespeicherhäuser aus Poroton-Ziegeln mit CALOSTAT-Füllung

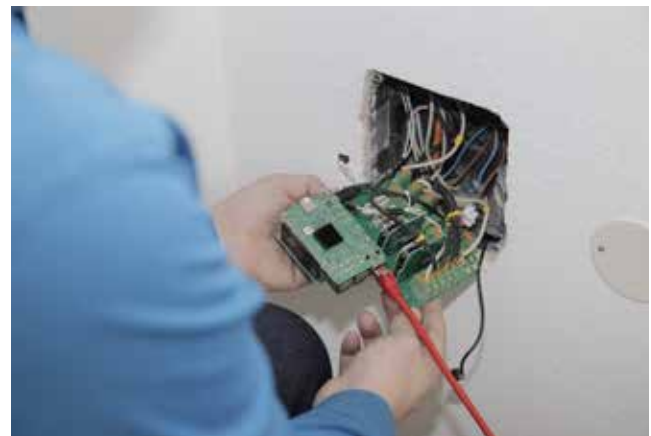


Abbildung 17: In den Wandaufbau integrierte Mini-Computer (Raspberry Pi) zeichnen Sensor-Messwerte auf.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein 1-jähriges Kurzzeit-Monitoring der Wandbaustoffe durchgeführt, wobei das thermische Verhalten der Wandbaustoffe bei allen Jahreszeiten abgebildet werden konnte. Exemplarisch sind in Abbildung 18 die Temperaturverläufe in den Wänden der Häuser 1 (CALOSTAT) und 8 (Perlite, Stand der Technik) über den Zeitraum von 1 Jahr gegenübergestellt. Im Sommer schwanken die Außentemperaturen und somit auch alle Temperaturen in den Wänden oberhalb und unterhalb der Raumtemperaturen. Die Temperatur-Amplituden eines jeden

Sensors im Wandquerschnitt sind im Sommer am größten und im Winter am geringsten. Im Frühling und im Herbst liegen die Temperatur-Amplituden zwischen beiden Extremwerten, wobei diese im Herbst noch unterhalb der Temperatur-Amplituden des Frühlings liegen.

Bei beiden Bauweisen lässt sich über den Wandquerschnitt verteilt eine Phasenverschiebung der Temperatur-Amplituden feststellen. Diese beträgt für die zweischalige Bauweise mit CALOSTAT vierzehn Stunden und 35 Minuten, was in etwa den im Vorfeld berechneten vierzehn Stunden entspricht. Für die Häuser der Standard-Bauweise mit Perlite-gefüllten Ziegeln, wird eine Phasenverschiebung von elf Stunden und fünfzehn Minuten festgestellt.

Aus dem Monitoring geht hervor, dass in Bezug auf die Wärmedämmung die zweischalige Bauweise mit CALOSTAT (Häuser 1 bis 4) zu jeder Jahreszeit der Standard-Wärmedämmung der Vergleichshäuser (5 bis 8) überlegen ist.

Dass die CALOSTAT-Häuser (1 bis 4) eine vergleichsweise bessere Wärmedämmung aufweisen, wird außerdem durch die Messung der Wärmestromdichten mit anschließender Berechnung der U-Werte (Abbildung 19), bestätigt.

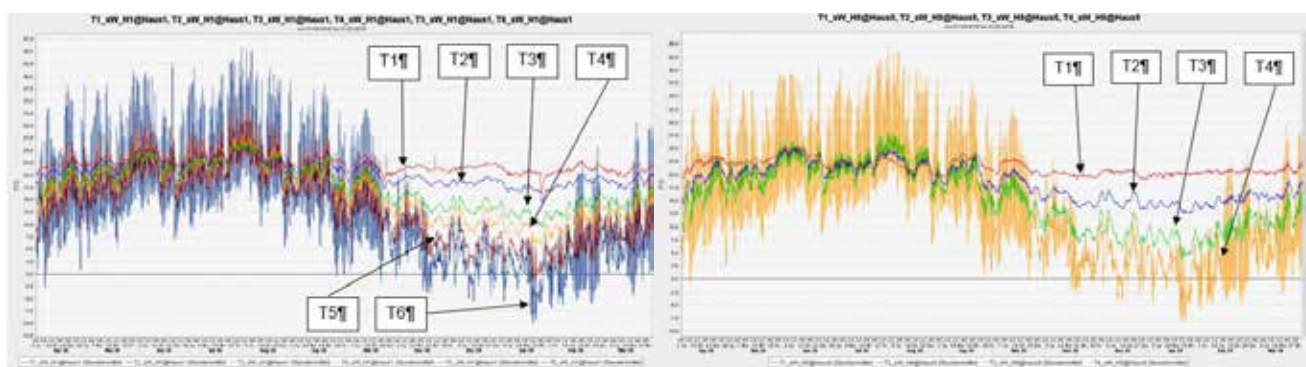


Abbildung 18: Temperaturverläufe in der West-Wand von CALOSTAT-Haus 1 mit zweischaliger Bauweise (links) und der West-Wand von Haus 8 in Standard-Bauweise gemäß Stand der Technik über den Zeitraum von 1 Jahr (rechts).

Die in den Wänden enthaltene rel. Luftfeuchtigkeit wird insbesondere durch die äußeren Umgebungsbedingungen beeinflusst und wirkt insbesondere auf die weiter außenliegenden Bereiche der Wandquerschnitte beider Bauweisen. In den weiter innenliegenden Segmenten der Wandquerschnitte ist eine Abnahme der rel. Luftfeuchtigkeit von Frühling, Sommer, Herbst und Winter festzustellen. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend über den weiteren Verlauf des Intensiv-Monitorings über weitere drei Jahre fortsetzen wird. Infolge der weiteren Abnahme der Baufeuchte kann erwartet werden, dass die derzeit gemessenen U-Istwerte, weiter in Richtung der U-Sollwerte abnehmen werden.

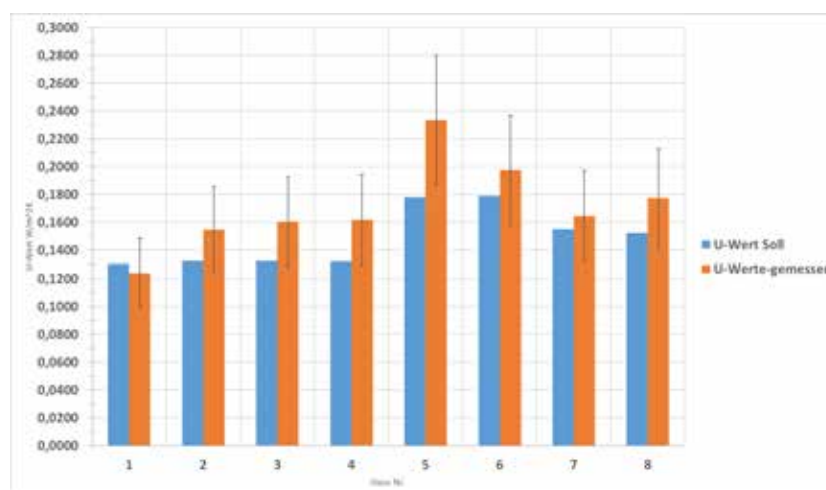
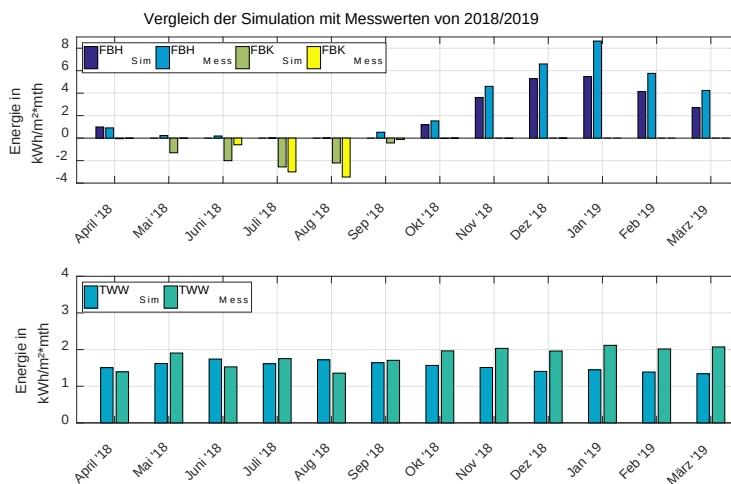


Abbildung 19: Gegenüberstellung der U-Werte der 8 Forschungshäuser. Bei Haus 1 bis Haus 4 handelt es sich um die zweischalige Bauweise mit CALOSTAT; bei Haus 5 bis Haus 8 handelt es sich um Gebäudehüllen gemäß „Stand der Technik“ mit perlitegefüllten Mauerziegeln. U-Istwerte (Orange), U-Sollwerte (Blau)

1.3.2 Gebäudetechnik: Monitoring und Betriebsoptimierung

Nach Abschluss des 12-monatigen energetischen Monitorings wurden die Messwerte mit den Ergebnissen aus Simulation und EnEV-Berechnung verglichen (Abbildung 20). Beim Vergleich mit den Simulationsergebnissen weicht die Heizenergie im Winter zum Teil deutlich ab. Hierfür sind höhere Lüftungswärmeverluste durch Undichtigkeiten der dezentralen Lüftungsgeräte sowie nutzerbedingte Fensterlüftung ausschlaggebend. In der Simulation wurde eine ideale Wärmerückgewinnung von 80 % angesetzt sowie keine Fensterlüftung. Zudem wurden teilweise höhere Raumtemperaturen eingestellt als in der Simulation mit 20 °C bis 22 °C angenommen. Die Kühlenergie wurde erst im Juni 2018 in Betrieb genommen. Die Kühlenergie im Juli und August zeigt höhere Werte als in der Simulation. Auch hier wird von höheren Lüftungsverlusten ausgegangen. Der WW-Verbrauch liegt etwas niedriger in der Simulation, besonders in den Herbst- und Wintermonaten. Der höhere WW-Verbrauch im Sommer ist auf die PV-geführte Steuerung und höhere Wärmeverluste zurückzuführen. Zum Vergleich wird die Heizenergie aus dem Energieausweis (EnEV) in der Tabelle aufgeführt, welche deutlich unter den Ergebnissen der Simulation und Messung liegt. Dies ist auf das Berechnungsverfahren der EnEV zurückzuführen.



Jahresverbrauch		
	Heizen in kWh/m²·a	TWW in kWh/m²·a
EnEV 2016	9,6	20,9
Simulation	23,4	18,5
Messung	33,2	21,8

Abbildung 20: Vergleich von Simulation und Messung hinsichtlich Heiz- und TWW-Energieverbrauchs.

Die PV-geführte Betriebsführungsstrategie wurde Mitte Oktober 2018 für die zwei modulierenden Wärmepumpen in Betrieb genommen. Abbildung 21 (links) zeigt die relative thermische Leistung in Abhängigkeit des Tages sowie der Tageszeit und bestätigt einen Betrieb mit höherer Leistung in den Wintermonaten in der Zeit zwischen 8 Uhr bis 12 Uhr. In den Monaten Dezember 2018 und Januar 2019 konnte der PV-Betrieb aufgrund der unzureichenden PV-Produktion kaum gestartet werden. In den Sommermonaten ist das gesenkte Temperaturniveau zur Bereitstellung der Quelltemperatur der Booster deutlich zu erkennen. Die Booster wurden erst im Januar 2018 in die PV-geführten Betriebsführungsstrategien eingebunden. Die Auswertung von August 2018 bis Dezember 2018 (rechts) zeigt, dass die Booster meistens in den Zeiten von 8 Uhr bis 9 Uhr sowie von 19 Uhr bis 23 Uhr laufen. Ab Januar 2018 verschieben sich die Betriebszeiten von 8 Uhr bis 13 Uhr. Die Betriebszeiten am späten Abend haben sich reduziert.

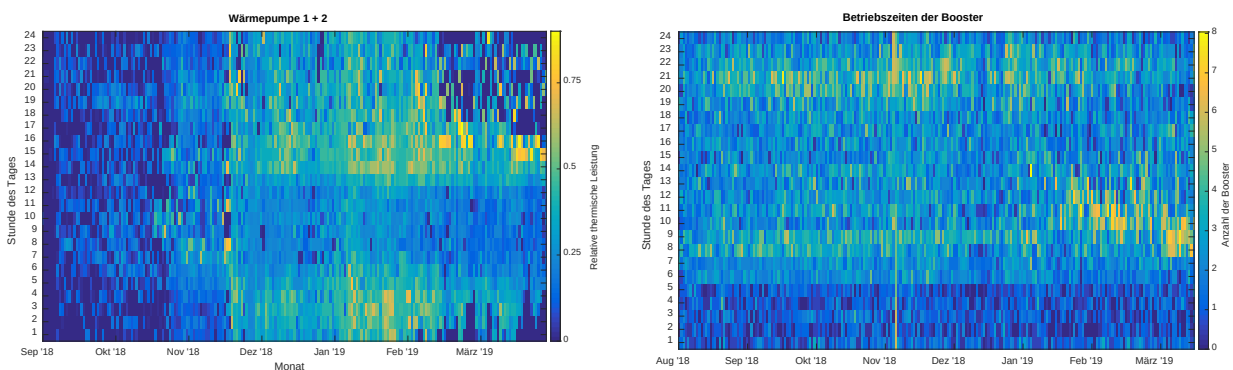


Abbildung 21: Betriebszeiten der Wärmepumpen (links) und Booster (rechts).

Das Projekt „HerzoBase – Energiespeicherhäuser“ wurde im Jahr 2019 beendet. Es ging nahtlos in ein dreijähriges Folgeprojekt „HerzoOpt“ (PTJ-FKZ 03ET1641A) über, das im Juni 2019 startete. Ziel ist das Langzeitmonitoring der Energiespeicherhäuser und die weitere Optimierung der Betriebsweise.

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 zu visualisieren. Die Steuerung des Flugroboters soll mit einem hohen Grad an Autonomie erfolgen, wodurch eine einfache Bedienbarkeit ermöglicht werden soll. Die Gebäudehülle soll auf Basis der erfassten Aufnahmen in dreidimensionaler Form rekonstruiert werden, so dass diese über eine intuitive Benutzerschnittstelle von allen Seiten aus betrachtet und deren Oberflächentemperatur analysiert werden kann.



Abbildung 22: DJI Matrice M210 mit 4K-RGB-Kamera und hochwertiger IR-Kamera (640x480 Pixel, 30fps).

Im Projektzeitraum bildete die Sammlung von Daten mittels Drohnenflügen einen Schwerpunkt der Arbeiten. 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. Aktuell liegen Flugsequenzen für 19 Gebäude vor, darunter Gebäude der TH Nürnberg und der FAU Erlangen, öffentliche Gebäude in Nürnberg (Schulen, Museen, Ämter, Rathaus) sowie Privathäuser.

Structure-from-Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) Verfahren verwenden i.d.R. Punktmerkmale wie SIFT zur 3D-Rekonstruktion von Gebäuden. Dieses Verfahren zeigt sich jedoch für Thermografie-Aufnahmen ungeeignet. Ein wesentlicher Schritt bei der Verarbeitung der Aufnahmen ist deshalb zunächst die exakte Registrierung der Bilder im thermischen und sichtbaren Bereich, d.h. die optimale geometrische Überlagerung der Bilder der beiden Kameras. Auf diese Weise kann die Rekonstruktion der 3D-Struktur mittels der optischen Aufnahmen geschehen und die Thermografie-Aufnahmen anschließend mit dem Modell überlagert werden.

Diese Bildregistrierung erwies sich als durchaus anspruchsvoll, da die sichtbaren Kanten im Wärmebild und optischen 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. Ein Beispiel hierfür sind Dekorelemente wie farblich umrahmte Fenster (nur im optischen Bereich sichtbar) oder entweichende Wärme an Wärmebrücken wie Stockwerksböden (nur im thermischen Bereich sichtbar). Gebäudefassaden bestehen zudem häufig aus wenigen, optisch unterschiedlichen, aber sich häufig wiederholenden Elementen, was die Gefahr von Falschzuordnungen mit sich bringt.

Lösungen dieser Problemstellung sind in der Literatur noch nicht beschrieben und es existiert auch kein geeigneter Benchmark. Daher wurde zunächst ein Testdatensatz mit 93 manuell registrierten Bildpaaren erstellt. Weiterhin wurde mit der Entwicklung einer Bildregistrierungspipeline begonnen, die aktuell 57 der 93 Bilder automatisch korrekt zur Deckung bringt.

Als besonderes Problem erwies sich, dass die Videostreams der an der Drohne montierten Kameras nicht akkurat synchron gestartet werden. In Sequenzen mit schnellem Steig- bzw. Sinkflug kommt es zu deutlichen Verschiebungen bis hin zu gar nicht mehr überlappenden Bildern zwischen Infrarot- und optischer Kamera. Zur Lösung dieses Problems wird im Rahmen einer Masterarbeit aktuell eine Synchronisation der Videostreams mittels Deep-Learning-Verfahren und optischem Fluss umgesetzt. Eine weitere laufende Masterarbeit befasst sich mit der semantischen Segmentierung, also etwa der Erkennung von Fenstern und Türen, unter Einbeziehung von optischen und thermischen Aufnahmen. Da z.B. Fensterkanten in Wärmebildern deutlicher erkennbar sind als auf optischen Aufnahmen, erwarten wir uns hierdurch eine weiter verbesserte Segmentierung.



Abbildung 23: Drohnenaufnahmen von Gebäuden mit optischer Kamera und korrekt registrierten Thermografie-Aufnahmen.

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 24):

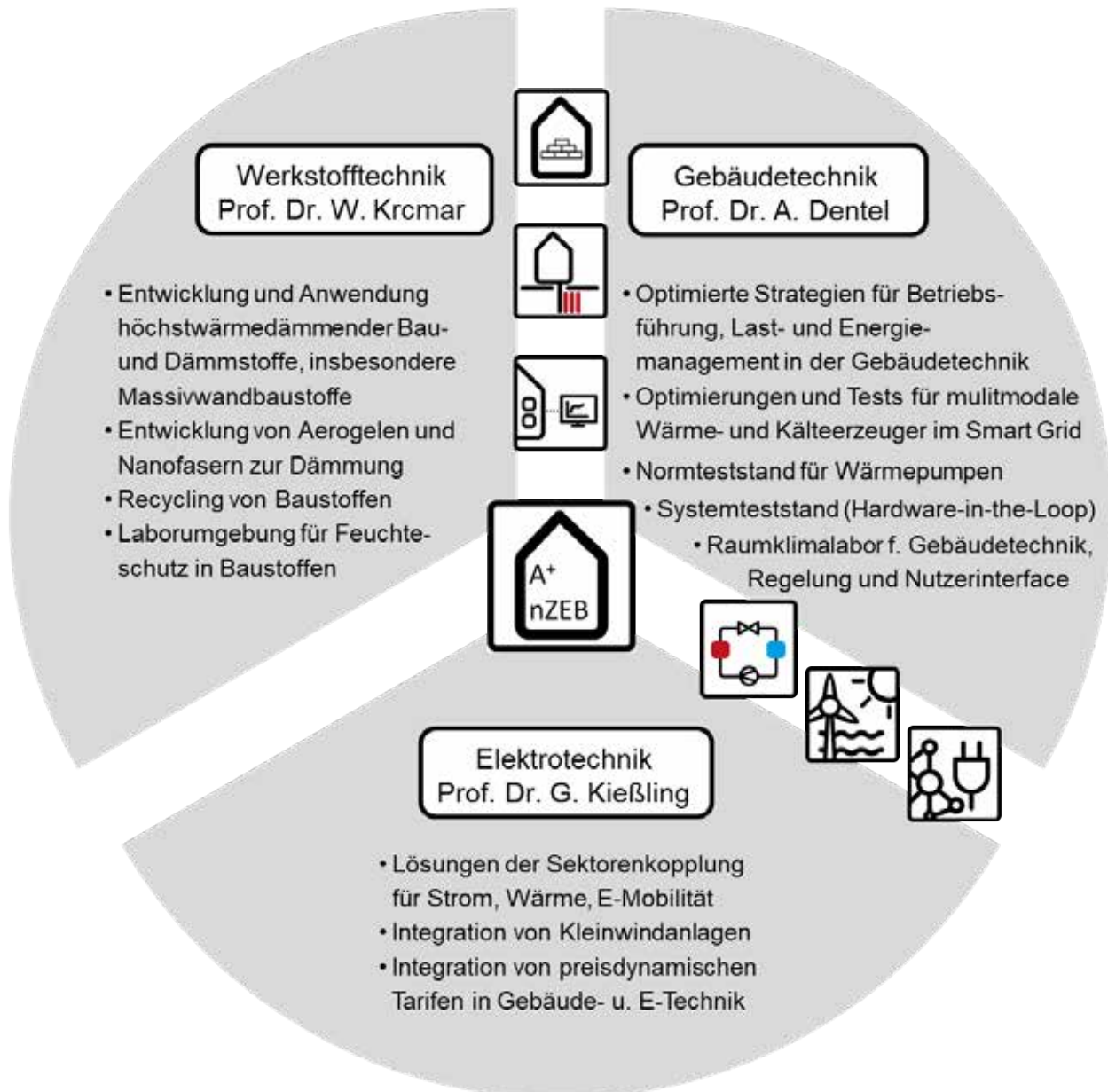


Abbildung 24: Strategische Weiterentwicklung der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude“

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 Nachfolger) 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 Arbeitsgruppen. Dies resultiert aus einer gewissen Grundlagenfinanzierung, der geschaffenen interdisziplinären und kollegialen Infrastruktur und nicht zuletzt aus dem ideellen Überbau durch den EnCN als Institution. Die Grundlagenförderung des EnCN bewirkt ein Vielfaches an Finanzmitteln durch Drittmittelprojekte.

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

- Antrag EU Projekt, call *LC-SC3-B4E-8-2020* (eingereicht 15.01.2020). Ca. 2,5 Mio € Gesamtbudget
- Antrag EU Projekt, call *LC-SC3-B4E-3-2020* (vorgesehen 15.09.2020). Ca. 4-6 Mio € Gesamtbudget
- Vorgespräche im Rahmen von *ZIM IraSME*. Gruppen Werkstofftechnik + Gebäudetechnik, mit kanadischem Hersteller Biomasse basierter Baustoffe. 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 Regelung), Honeywell Deutschland/ international (Entwicklung und Demonstration modellprädiktiver Anlagenregelungen)
- Vorgespräche mit Institut für Umweltenergie (IfU). Demogebäude / Reallabor / Energie- und Anlagekonzept mit Bodenplattenaktivierung/ Entwicklung und Optimierung der Regelung
- Vorgespräche mit Fa. B.A.M (Bio-Composites And More GmbH)/ Fa. Preform GmbH zur Produktentwicklung im Rahmen von ZIM-Förderung, ggf. EU-Förderung (Begleitung Baustoffentwicklung, Optimierung der Produktion, energetische/stoffliche Studien). Ggf. mit weiteren EU-Partnern.
- Vorgespräche zur Quartiersentwicklung „auf AEG nord“, mit Fa. CENERO Energy GmbH & Fa. MIB AG / MIB PROJEKTENTWICKLUNG GMBH (Energiekonzept, Betreiberkonzept, Machbarkeitsstudie, u.a. Förderprogramm *Wärmenetze 4.0*).

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

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

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

2.1 Arbeiten und Ergebnisse

Im vergangenen Förderjahr 2019 erfolgten die ersten messtechnischen Verifikationen der bisher entwickelten (semi-)analytischen sowie numerischen Berechnungsmodelle mithilfe der beiden Versuchsmaschinen VM316 (konventionelle Induktionsmaschine mit Strangzahl $m = 3$) und VM631 (mehrphasige Induktionsmaschine mit $m = 2 \cdot 3$). 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 Schaltzustände 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 Zusatzraumzeigerebenen z . Letztere führen lediglich zu Stromüberschwingungen und somit zur Erhöhung der umrichterbedingten Zusatzverluste. Die Minimierung dieser Überschwingungsströme bei gleichzeitiger Maximierung der drehmomentbildenden Grundsatzkomponente 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. Abbildung 25 zeigt beispielhaft eine Sequenz der diskreten Umrichterspannungsraumzeiger in der drehmomentbildenden Ebene (links) und einer Oberschwingungsebene (rechts) für eine sechsphasige Pulsweitenmodulationsvariante (CSVPWM24).

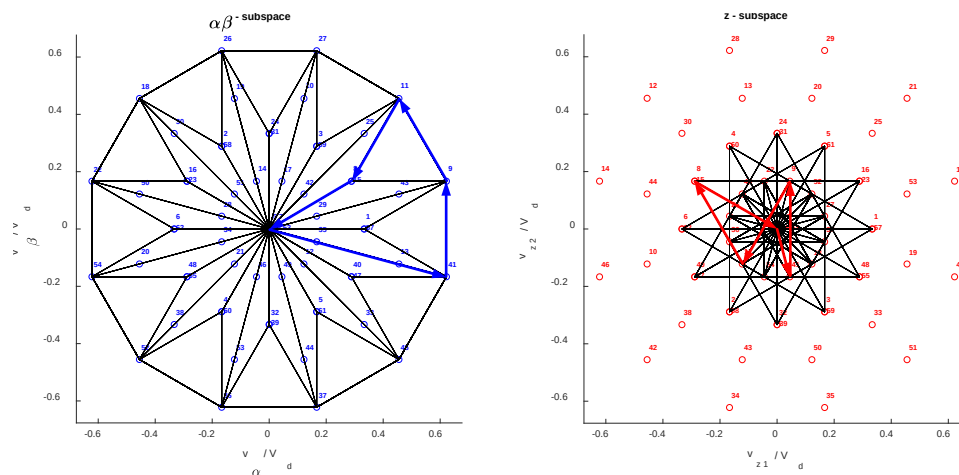


Abbildung 25: Spannungszeiger in der $\alpha\beta$ - und in der z -Ebene.

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 26 stellt die im Leerlauf gemessenen umrichterbedingten Zusatzverluste der implementierten Modulationsvarianten dar. Besonders vorteilhaft für hohe Aussteuergrade m erweisen sich optimierte diskontinuierliche Modulationen (DSVPWM24).

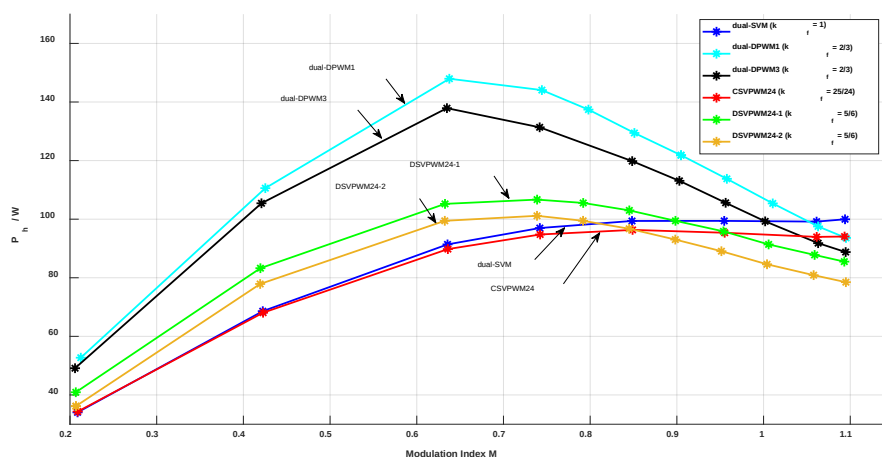


Abbildung 26: Umrichterbedingte Zusatzverluste in Abhängigkeit des Aussteuergrades: messtechnischer Vergleich verschiedener Modulationsverfahren an der $2 \cdot 3$ -strängigen Versuchsmaschine.

Zudem ergaben sich während der messtechnischen Verifikation einige wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Auslegungskriterien für Induktionsmaschinen mit mehrphasiger Wicklungskonfiguration. So müssen die bekannten Kriterien für konventionelle Maschinen auf Eignung für mehrphasige Maschinen hin überprüft werden. 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 modell-prädiktiven Regelung (MPC) als Ansteuerverfahren betrieben werden. Zum aktuellen Zeitpunkt wird ein Umrichtersystem entwickelt, welches in Zusammenspiel mit der Zynq Berechnungsplattform die Mehrphasenmaschine ansteuert. Anschließend soll auf diese Plattform die modellprädiktive Regelung implementiert werden, um die MPC als geeignetes Ansteuerverfahren für Mehrphasenmaschinen bewerten zu können.

2.3 Kooperation mit der Industrie

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2019 im Rahmen des EnCN weitere Kooperationen auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik, insbesondere im Bereich Steigerung der Energieeffizienz entstanden. Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie sind:



Abbildung 27: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft.

Besonderen Einfluss auf die umrichterbedingten Stromwärmeverluste haben die Stromverdrängungseffekte in der Statorwicklung. Um diese Verluste bereits während der Auslegungsphase mit ausreichender Genauigkeit berechnen zu können, entstand ein eigenes Forschungsprojekt in dessen Rahmen unterschiedliche Wicklungsvarianten mithilfe von numerischen und analytischen Methoden untersucht und an Versuchsmustern messtechnisch verifiziert wurden.

Am Messplatz zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften unterschiedlicher weichmagnetischer Materialien, aus der ersten Förderphase, wurden wissenschaftliche Arbeiten zum Einfluss des Stanzwerkzeugverschleißes auf das Magnetisierungsverhalten und die Eisenverluste in Elektroblechen durchgeführt. Durch die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern thyssenkrupp AG und Waasner GmbH stellt dieser realitätsnah durchgeführte Versuch eine bisher einzigartige Möglichkeit zur Verbesserung der Berechnung elektrischer Maschinen dar.

Im Bereich der Antriebstechnik am EnCN werden innovative Maschinenkonzepte untersucht. Mit der Pation-Stator Flux Reversal Maschine (PS-FRPM) können bei gleichem Drehmoment Permanentmagnete und somit Seltene Erden eingespart werden. Ein weiteres Forschungsprojekt vergleicht verschiedenste Topologien von Transversalfluss-Maschinen als energieeffiziente Generatoren für Kleinwasserkraftwerke.

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

2.4 Personal

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

2.5 Ausblick

Mit den bisherigen Erkenntnissen werden im nächsten Förderjahr 2020 die Oberschwingungsmodelle zur Bestimmung der umrichterbedingten Zusatzverluste in der Auslegungsphase weiter optimiert. Des Weiteren werden neue Auslegungskriterien für mehrphasige Induktionsantriebe erarbeitet bzw. die bestehenden Kriterien auf Eignung überprüft. Zurzeit wird an einem algebraischen Wicklungsentwurf gearbeitet, um die Ausführbarkeit mehrphasiger Maschinen mit den üblichen Nut-/Polpaarzahl Kombinationen der Statorblechpakete im industriellen Umfeld bewerten zu können. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Auslegung verschiedener Maschinenkonfiguration im höheren Leistungsbereich ab Baugröße 355 und der Vorausberechnung der Steigerungspotentiale hinsichtlich der Energieeffizienz.

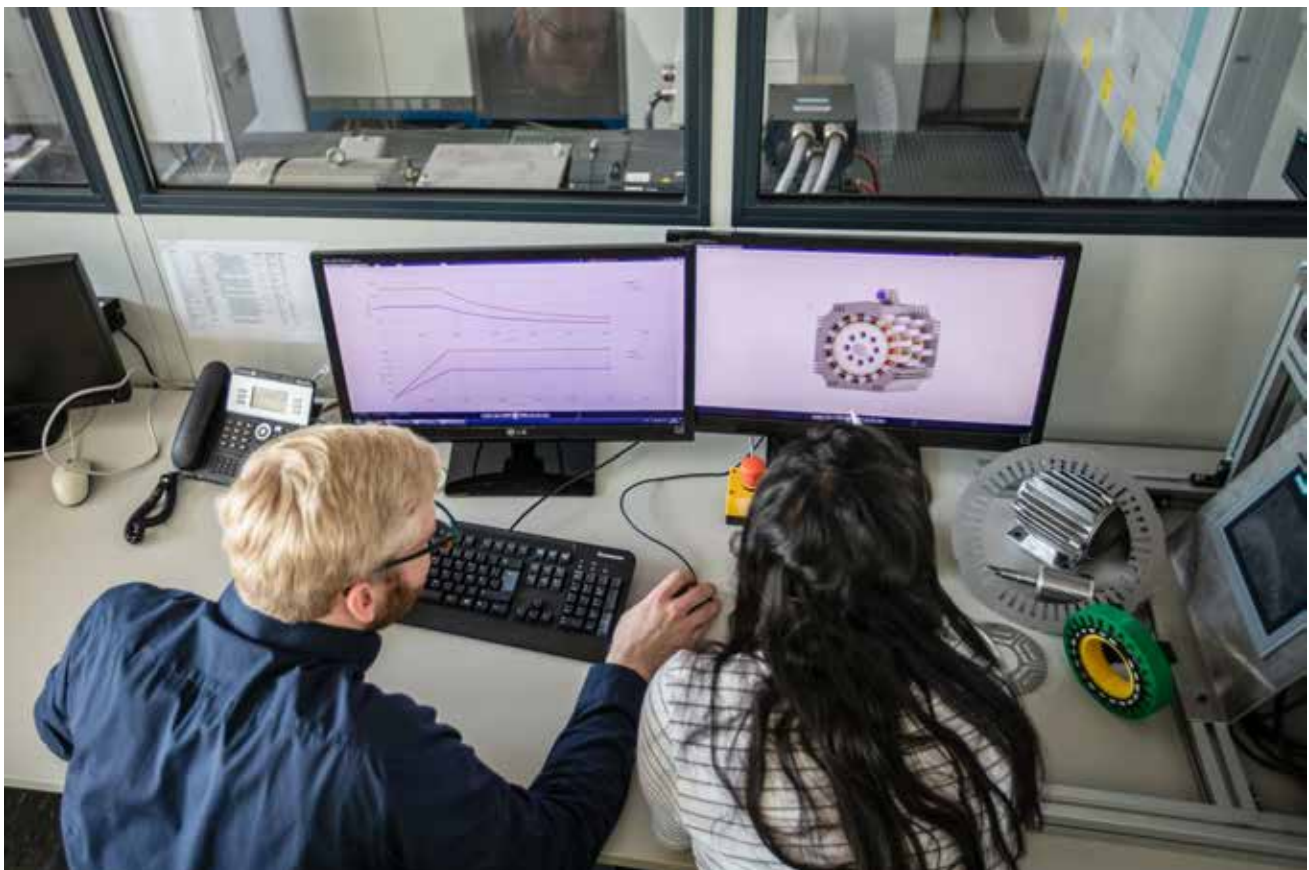


Abbildung 28: Auslegung innovativer elektrischer Antriebe mit Hilfe von 3D- Feldberechnungen

3 Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme; *Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz, M.Sc. Sebastian Wendel, M.Sc. Tobias Schindler, M.Sc. Michael Hoerner, M.Sc. Michael Gerstner, B.Eng. Thilo Wendt, B.Eng. Barnabas Haucke-Korber und B.Eng. Philipp Gebhardt*

Die Energieeffizienz ist heute eines der wichtigsten Themenfelder in der Antriebstechnik im Hinblick auf Forschungsbedarf und wirtschaftlicher Bedeutung. Ein weiteres an Bedeutung gewinnendes Themenfeld in der Industrie ist sowohl die durch Software definierte Ausprägung der Produktentstehung als auch die Software des Produktes an sich. Dieses Paradigma hat sich im deutschen Sprachraum als „Industrie 4.0“ etabliert und beinhaltet auch die elektrischen Antriebe. Eine Verknüpfung dieser zwei Hauptströmungen - Energieeffizienz und Software - soll im folgenden Konzept für elektrische Antriebe erforscht und erschlossen werden.

Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Effizienzsteigerung des elektrischen Antriebsstranges durch Ansteuer- und Regelungskonzepte. Ziel ist es, neue Regelungsalgorithmen zu erforschen und zu entwickeln, die die üblichen regelungstechnischen Anforderungen an Dynamik und Störverhalten erfüllen und darüber hinaus schon direkt im Regelungsalgorithmus die Energieeffizienz berücksichtigen und optimieren. Als Grundlage für diese neuen Verfahren wird das sogenannte modellbasierte prädiktive Regelungsverfahren (MPC) gesehen, dass im geplanten Forschungsvorhaben um Verlustmodelle der Komponenten des Antriebsstranges erweitert wird.

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 algorithmische Umsetzung (Software) in industriellen Antriebsaufgaben aufweisen.

3.1 Arbeiten und Ergebnisse

Das Institut ELSYS beschäftigt sich seit nunmehr 4 Jahren mit neuartigen Regelungsverfahren wie der modellprädiktiven Regelung (MPC). Erste experimentelle Erfahrungen bei der Implementierung der Regelalgorithmen auf Mikrocontroller haben gezeigt, dass die komplexen MPC-Algorithmen zumeist nicht schnell genug berechnet werden können und die Modellgenauigkeit oft unzureichend ist. Daher wurden im Laufe des ersten Jahres der EnCN-Förderphase vor allem die Modelle der MPC Regelung erweitert sowie die Modellgenauigkeit optimiert. Im zweiten Jahr der Förderphase wurden die Implementierung der Algorithmen und deren experimentelle Validierung fokussiert. Des Weiteren wurden die bekannten MPC Strukturen zu einem neuartigen kaskadierten MPC Ansatz, welcher in Abbildung 29 schematisch dargestellt ist, weiterentwickelt. Die genannte Idee wurde zum europäischen Patent angemeldet (vgl. Veröffentlichungen).

Im dritten Jahr wurde die experimentelle Verifikation fortgeführt, allem voran unter dem Gesichtspunkt der Verlustminimierung. Hierfür wurde ein variabler Schaltzeitpunkt, durch die Berechnung von Stromgradienten, eingeführt, welcher es ermöglicht, bei gleichbleibenden Schaltverlusten einen reduzierten Stromrippel und damit eine minimierte Total Harmonic Distortion (THD) zu erzeugen. Überdies wurde durch einen neuen Mitarbeiter begonnen, die Systematik auf Mehrphasensysteme (Effizienz – TPJ2) zu übertragen. Derzeit erfolgt die Erprobung an industrienahen Anlagen in Kooperation mit zwei Industriepartnern. Hierbei werden die Algorithmen z.B. bei der Afag GmbH am Beispiel eines Linear-Schwingförderers, als Zuführsystem bei Produktionsstraßen, durch eine optimierte und verlustminimierte Strom- und Beschleunigungsregelung, erprobt. Ein weiterer Test-Case ist die Erprobung bei der Kübrich Ing. mbH, wo ein hochdynamisches und verlustoptimiertes Prüfsystem für End-of-Line Tests im Automotive Sektor entsteht.

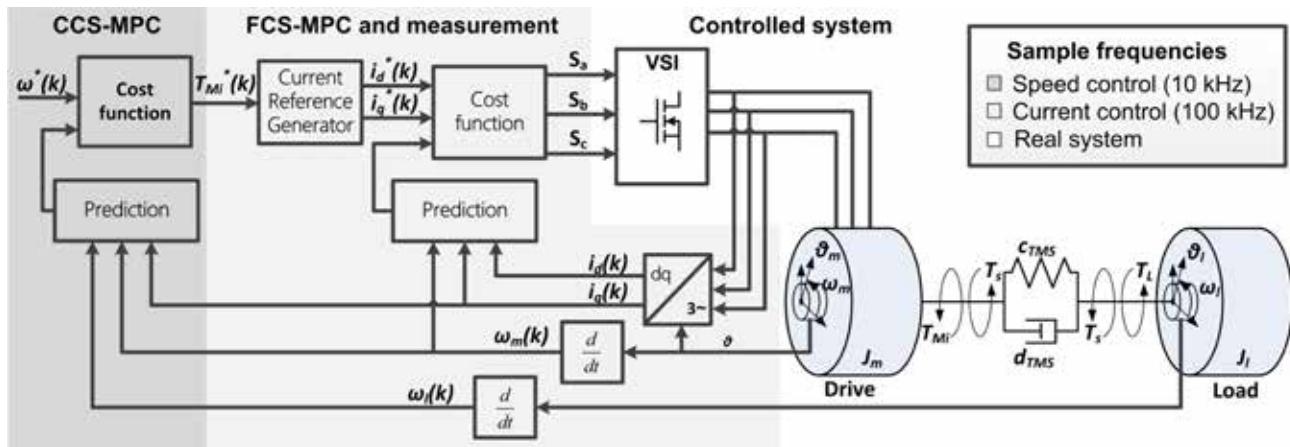


Abbildung 29: Kaskadierter modellprädiktiver Regelungsansatz zur Optimierung von mechatronischen Antriebssystemen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die Modelle zur Vorhersage des Maschinenverhaltens mit verschiedener Detailltiefe von den zu betrachtenden Maschinen (v. a. Synchronmaschine, Asynchronmaschine) teilweise neu erstellt, verbessert und erweitert sowie im diskreten Zeitbereich dargestellt. Die größten Herausforderungen lagen hier zum einen in der vorteilhaften Formulierung der Modellgleichungen, sodass möglichst wenige Rechenschritte auf dem Prozessor/FPGA benötigt werden. Zum anderen galt es, die komplexen Verlustmechanismen elektrischer Maschinen (z. B. Reibungs- und Eisenverluste) auf möglichst einfache und dennoch präzise Art abzubilden und in die Prädiktionsmodelle zu integrieren. Gleichzeitig mussten Gütefunktionale zur Auswertung der Prädiktionsmodelle entwickelt werden.

Des Weiteren wurden verschiedene Kriterien betrachtet, welche bei dem Betrieb eines Antriebssystems oder anderen leistungselektronischen Systems berücksichtigt werden können (z.B. Schwingungen bei der Zwischenkreisspannung, mechanische Schwingungen an der Antriebsachse). Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde festgestellt, dass die direkte Optimierung der Schalterstellungen in der Leistungselektronik, was eine Minimierung der Schaltverluste ermöglicht, zu einem erhöhten Stromrippel in der elektrischen Maschine führen kann. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf Basis einer Gradienten-Berechnung, einen variablen Schaltzeitpunkt für die prädiktive Stromregelung ermöglicht. Dieses neuartige, sogenannte VSP2CC Verfahren ist in der nachfolgenden Abbildung 30 schematisch dargestellt. Hierbei wird der RMS-Fehler integriert und anschließend die Kombination aus zwei diskreten Schalterstellungen mit dem idealen Schaltzeitpunkt ausgewählt, welche die geringste Stromfehlerfläche verursacht.

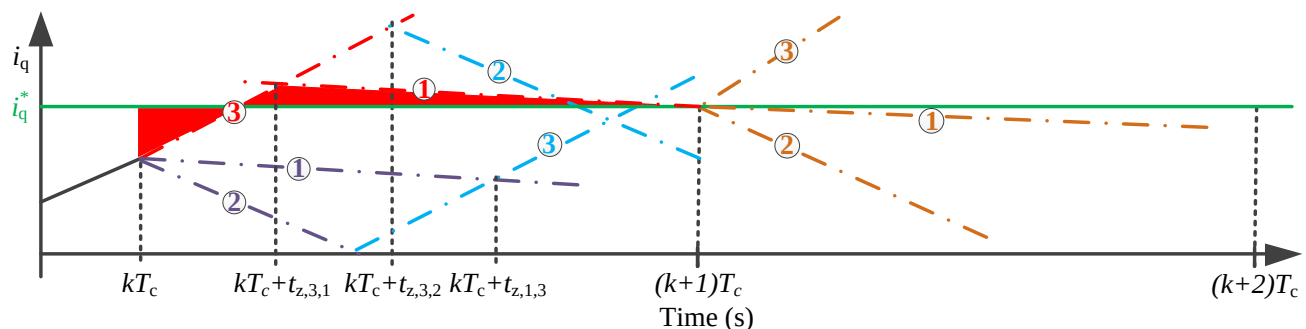


Abbildung 30: Variable Schaltpunkte durch den Schnittpunkt zweier i_q -Strom Gradienten für $N_p = 2$

Alle erstellten Modelle und Kostenfunktionen werden in der Simulationsumgebung (MATLAB/Simulink) erprobt und mit den herkömmlichen Regelungs- und Ansteuerkonzepten (feldorientierte Regelung und direkte Drehmomentregelung) verglichen. Die in der Simulation erprobten Modelle, für die unterschiedlichen Regelungsverfahren, werden hierbei mittels Rapid Control Prototyping (RCP) in plattformunabhängigen C-Code für den integrierten Mikrocontroller bzw. in VHDL für das FPGA überführt. Wie bereits im Jahresbericht 2018 beschrieben, wurde für die nachfolgende experimentelle Erprobung auf ein SoC-FPGA (Zynq-7020) gesetzt, welches eine heterogene Berechnung der MPC Algorithmen ermöglicht. Hierzu wurde die Berechnungsplattform „OHMrichter“ entwickelt. Wie die Untersuchungen jedoch gezeigt haben, ist vor

allein in Hinblick auf neuartige Mehrphasen- und Multilevel-Systeme, sehr schnell die maximale Anzahl an schaltbaren Kanälen, als auch erneut die Performance-Grenze erreicht. Aus diesem Grund ist, in Kooperation mit weiteren Universitäten, die „UltraZohm“ Berechnungsplattform, als Weiterentwicklung vom OHMrichter, entstanden. Hierbei wurde auch unter dem Gesichtspunkt der rapiden Zunahme an Machine Learning Algorithmen in der elektrischen Antriebstechnik, wie z.B. Reinforcement Learning, der Aspekt der parallelen Netzberechnung mit aufgenommen. Diese, in Abbildung 31 gezeigte Plattform, ermöglicht eine maximale Flexibilität in Kombination mit der aktuell maximalen, kommerziell erhältlichen, heterogenen Berechnungskapazität. Die genannte Plattform ermöglicht die Erprobung von längeren Horizonten für MPC, was eine deutliche Optimierung des THD bedeutet, als auch die effiziente Ansteuerung von Mehrphasensystemen.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Weitere Publikationen sind geplant.



Abbildung 31: UltraZohm: Leistungsstarke Echtzeit-Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme.

3.2 Kooperation

Innerhalb des EnCN ist der Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerungsverfahren sehr eng mit dem Teilprojekt 2 vernetzt. Hierbei wird MPC als Ansteuerungsverfahren für die in Teilprojekt 2 behandelte Mehrphasenmaschine genutzt. Hierfür wurde ebenfalls ein Umrichtersystem entwickelt, welches in Zusammenspiel mit der Zynq- Berechnungsplattform die Mehrphasenmaschine ansteuert. Erste MPC Algorithmen wurden für die mehrphasigen Antriebe entwickelt. Hierbei sollen die Themenschwerpunkte Modellgenauigkeit und Verlustmodelle weiterhin gemeinsam optimiert werden. Des Weiteren findet eine Vernetzung mit dem Themenfeld von Prof. Dr. Dentel (TH Nürnberg) statt. Im Themenbereich von Prof. Dr. Dentel sind zwar bedeutend größere Zeitkonstanten wirksam, jedoch sind durchaus Überschneidungen bei der MPC-Systematik vorhanden. Ein gemeinsamer Workshop wurde bereits ausgearbeitet.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des EnCN-Teilprojektes mehrere industrielle Forschungsprojekte beantragt. Hierfür ist beispielhaft das Forschungsvorhaben „Modellbasierte und intelligente Kleinantriebstechnik“ (MIKA), in Kooperation mit der Afag GmbH und der Kübrich Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG durch den Fördergeber VDI/VDE. In diesem Vorhaben soll eine flexible Hardware sowie intelligente Regelalgorithmen für den universellen Betrieb von rotatorischen und translatorischen Kleinantrieben auf Basis eines SoC-FPGAs entwickelt werden.

Seit November 2017 wirkt ein Zusammenschluss aus Technischer Hochschule Nürnberg, der Technischen Universität München sowie der Universidad de Santiago de Chile an der Entwicklung einer gemeinschaftlichen Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme auf Basis des Zynq-Ultrascale-SoCs zusammen. Die Gemeinschaft, unter Leitung der Technischen Hochschule Nürnberg, hat bereits die erste Generation der hochperformanten Berechnungsplattform, vgl. Abbildung 31, entwickelt. Diese Plattform soll nun, unter dem Leitfaden Open-Access, für weitere Interessenten zur Verfügung gestellt werden. Außerdem wurde unter Leitung von Prof. Dietz ein gemeinsamer Forschungsantrag „KI-Power“ beim BMBF gestellt, welcher voraussichtlich ab April 2020, über eine Laufzeit von bis zu 5 Jahren, das Plattformthema vorantreiben wird.

Seit Beginn der Förderphase laufen im Rahmen von TPJ3 drei kooperative Promotionen. An der TU München promoviert Herr Sebastian Wendel (M.Sc.) mit dem Titel „Modellbasierte prädiktive Regelung von Kleinantrieben“ und Herr Michael Heorner (M.Sc.) mit dem Titel „Energieeffiziente prädiktive Regelung von mehrphasigen Antrieben“. Betreuender Professor seitens der TU München ist Herr Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik. An der FAU Erlangen-Nürnberg promoviert Herr Michael Gerstner (M.Sc.) mit dem Titel „Energieeffizienter Betrieb von DC/DC-Wandlern mit weitem Eingangsspannungsbereich“ bei Prof. Dr.-Ing. Martin März, Lehrstuhl für Leistungselektronik.

3.3 Kooperation mit der Industrie

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2019 im Rahmen des EnCN weitere Kooperationen auf dem Gebiet der elektrischen Antriebstechnik, insbesondere im Bereich Steigerung der Energieeffizienz entstanden. Neu hinzugekommene Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie sind in Abbildung 32 dargestellt:



Abbildung 32: Im Berichtszeitraum hinzugekommene Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft.

3.4 Personal

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

3.5 Ausblick

Im Jahr 2020 erfolgt eine ausführliche experimentelle Verifikation bei den genannten Industriepartnern. Hierbei soll der Mehrwert, in Bezug auf Effizienz als auch Dynamik, im Vergleich zu den bereits bekannten Verfahren zur Ansteuerung von elektrischen Antriebssystemen, herausgestellt werden. Die Innovation der entwickelten MPC Algorithmen soll hierdurch, zusätzlich zu den Ergebnissen im Labor, an realen Systemen verifiziert werden. Die Übertragung auf mehrphasige Antriebssysteme, welche im Effizienz-TPJ2 betrachtet werden, stellt einen weiteren Schwerpunkt dar.

3.6 Interdisziplinarität

Vernetzung mit anderen Forschungsbereichen im EnCN, gemeinsame interdisziplinäre Projekte und Projekte mit verschiedenen EnCN-Institutionen

Im Rahmen der interdisziplinären Zusammenarbeit innerhalb des Energiecampus Nürnberg wurde die umfangreiche Schwingungsmesstechnik des Institut ELSYS für die Modalanalyse von 3D-gedruckten Ziegeln aus der Forschungsgruppe von Prof. Krcmar eingesetzt. Hierfür wurde auf das 3D-Laserscanning Vibrometer (PSV-500) zurückgegriffen. Mit diesem konnten verschiedene Ausführungen mit Simulationsergebnissen abgeglichen werden. Die Modalanalyse der Ziegel gibt hierbei Aufschluss über deren Eigenschaften hinsichtlich der Schalldämpfung und ist somit wichtiges Kriterium für den Einsatz innovativer Wandbaustoffe.

Im Verbundvorhaben COSIMA (Förderkennzeichen 0324291C), in dem „Ertragskontrolle und –vorhersage von Solarparks durch intelligentes Qualitätsmanagement“ erforscht wird, bearbeitet die Arbeitsgruppe von Prof. Dietz das Teilvorhaben Simulation und Regelungsentwicklung für einen multifunktionalen Wechselrichter. Wissenschaftlicher Partner ist das Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien (IEK-11).

Kooperation über die Grenzen der Partnerinstitutionen hinaus

Das Institut ELSYS stellte im Jahr 2019 erfolgreich einen Antrag bei der Bayerischen Forschungsallianz zur Anbahnung internationaler Forschungsk Kooperationen (BayIntAn). Mit den bewilligten Mitteln vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst konnte eine erste Intensive Kontaktaufnahme mit den Profs. Di Tommaso und Miceli vom Department of Energy, Information Engineering and Mathematical Models der Universität Palermo finanziert werden, um das internationale Expertennetzwerk im Bereich Antriebstechnik in der E-Mobilität des Instituts zu erweitern. Erste Schritte zur weiteren Vertiefung der Beziehungen innerhalb von Forschungsprojekten im Bereich Antriebe mit Mehrphasenmaschinen wurden bereits begonnen und weitere Treffen sind für das Jahr 2020 bereits geplant.

Des Weiteren wirkt seit November 2017 ein Zusammenschluss aus Technischer Hochschule Nürnberg, der Technischen Universität München sowie der Universidad de Santiago de Chile an der Entwicklung einer gemeinschaftlichen Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme zusammen.

3.7 Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

In der zweiten Förderphase des EnCN wurden bereits zwei Promotionsvorhaben an der TU Kaiserslautern und der TU Ilmenau erfolgreich abgeschlossen. Eine weitere Dissertation ist an der TU München bereits zur Begutachtung eingereicht. Mit Abschluss der zweiten EnCN Förderphase werden voraussichtlich fünf weitere Promotionen an der TU München und der FAU Erlangen-Nürnberg abgeschlossen. Acht Promotionskandidaten befinden sich derzeit in der Promotionsfindungsphase.

Im Rahmen des Masterprogramm „Applied Research in Engineering Science“, in Kombination mit den Möglichkeiten am EnCN, konnten bisher 15 Masteranden in industrienahen Forschungsprojekten ihr Masterstudium erfolgreich abschließen und sind bei den kooperierenden Industriepartnern als hochqualifizierte Young-Professionals sehr angesehen sowie beliebte Einstiegs-kandidaten. Weitere Masterarbeiten laufen derzeit. Zahlreiche Bacheloranden und Werkstudenten werden jährlich in die Forschungsarbeiten am EnCN integriert und erlangen dabei, neben der Hochschullehre, wertvolle Qualifikationen.

Für alle ehemaligen Studenten und Mitarbeiter gibt es neben Xing- und LinkedIn-Gruppen zweimal im Jahr ein Treffen, bei welchen die meisten der Ehemaligen sich rege beteiligen. Des Weiteren haben sich durch einige der Ehemaligen neue Forschungsk Kooperationen am EnCN ergeben (z.B. Porsche AG, Siemens AG und Kübrich Ingenieurgesellschaft).

3.8 Technologietransfer

Technologietransfer-Aktivitäten:

- SPS – Smart Production Solutions – Messe

Im Effizient-TP3 wurde die in Abbildung 31 gezeigte Echtzeit-Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme entwickelt. Diese ist ein entscheidender “Enabler” bei der Implementierung und Erprobung neuartiger Regelungs- und Ansteuerkonzepte für den effizienteren Betrieb von leistungselektronischen Systemen. Das System wurde unter regem Andrang auf der SPS Messe in Nürnberg, als Kooperationspartner der Xilinx Inc., einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Industrie vorgestellt.



- Zahlreiche Messaufträge

Die entwickelten Ansteuerplattformen als auch Umrichtersysteme wurden in zahlreichen Industrieprojekten als auch Messaufträgen an produktnahen Lösungen der genannten Industriepartner erprobt. Hierbei wurden für entstandene Problemstellungen gemeinsame Lösungen erarbeitet und diese Lösungen in Form von Algorithmen und elektronischen Schaltungen in die Industrielösungen übertragen. Die Messung der magnetischen Eigenschaften von elektrischen Maschinen, durch ein am EnCN betriebenes Messsystem, ermöglichte es zahlreichen Industriepartnern, ihre Verlustmechanismen in der elektrischen Maschine besser zu verstehen und zu beschreiben.

Patente:

Es wurden im Rahmen des EnCN2 im Unterprojekt TP3, drei Erfindungen angemeldet, wovon ein Patent [3] bereits erteilt ist sowie zwei weitere in der Begutachtungsphase sind [4], [5].

Spin-Offs:

Es wurde bereits im Rahmen des EnCN1, im Teilprojekt Effizienz, die Firma DHG Engineering GmbH gegründet. Im Rahmen des EnCN2 haben weitere ehemalige Studenten und wissenschaftliche Mitarbeiter ein Beschäftigungsverhältnis bei DHG Engineering aufgenommen. DHG ist auch Forschungspartner im Verbundvorhaben COSIMA.

4 User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben;

Hochschule Ansbach – Fakultät Technik; Prof. Dr. W. Schlüter, M.Sc. J. Dettelbacher, M.Sc. J. Hanna, M.Sc. D. Wagner, M.Sc. K. Zacharias, B.Eng. F. Mielke, B.Eng. D. Broszeit

Einleitung und Motivation

Im Dezember 2019 stellte die EU-Kommissionspräsidentin von der Leyen den Green Deal als zentrales Projekt ihrer Amtszeit vor. Der Plan sieht vor, dass die EU bis zum Jahr 2030 50 % weniger Treibhausgase als im Vergleichsjahr 1990 ausstoßen soll. Als ein entscheidender Bereich für die Erreichung des Ziels wurde die Energieeffizienz identifiziert, die um 32,5 % steigen soll. Besonders hoch ist das Einsparungspotenzial in energieintensiven Industriezweigen, wie z. B. der Nicht-Eisen (NE)-Gussindustrie. In Deutschland werden jährlich 5,4 Mio. t Metall erschmolzen und vergossen, davon 1,2 Mio. t Nicht-Eisen-Werkstoffe. Geht man von dem Energieeinsatz von 2000 kWh pro t guter Guss aus, ergibt sich ein jährlicher Energieverbrauch von 2,4 Mrd. kWh in der Nicht-Eisen-Gussindustrie. Nach einer offiziellen Auswertung des Statistischen Bundesamtes beträgt der Energiekostenanteil an der Bruttowertschöpfung der Gießerei-Industrie über 25 %. Dies zeigt, dass der Energieverbrauch nicht nur hinsichtlich der CO₂-Einsparung in Deutschland, sondern auch für Gewinn und Wettbewerbsvorteile der Gussunternehmen entscheidend ist und geeignete Maßnahmen für mehr Energieeffizienz in den in starkem internationalen Wettbewerb stehenden Unternehmen unabdingbar sind.



Abbildung 33: IR-Aufnahme eines Aluminium-Schmelzofens.

Das oberste Ziel eines Gussbetriebes ist die Sicherung der Produktion der Gussmaschinen durch ausreichende Versorgung mit flüssigem Metall. Überlegungen zur Energieeffizienz spielen aktuell bei der Steuerung der Flüssigmetallversorgung keine Rolle. Insbesondere stehen Energie- und Produktionsdaten in aufbereiteter Form durch aktuelle Kennzahlen in der NE-Gussindustrie nicht zur Verfügung. Dies liegt im Wesentlichen an dem vergleichsweise geringen Automatisierungsgrad der Branche. Im Projekt User Interface Design von Energiedaten wird 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.

4.1 Prozessmonitoring und digitale Störfallanalyse

Mittelständische Gießereiunternehmen verfügen oftmals nur über einen sehr geringen digitalen Reifegrad. Hier fehlen einfach zu implementierende Lösungen, um die Kompetenzlücke zu Großunternehmen zu schließen. Anhand einer prototypischen Softwarelösung bei einem mittelständischen Kooperationspartner werden die Vorteile eines digitalen Produktionsabbildes verdeutlicht und für die Branche sichtbar gemacht. In einer Veröffentlichung in der führenden deutschen Fachzeitschrift GIESSEREI wurden die Motivation für das Softwarepaket, der Funktionsumfang und die entstehenden Chancen detailliert dargestellt.

Die Software, die in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner pressmetall Gunzenhausen GmbH entwickelt wurde, sammelt Maschinendaten aus der Produktion und visualisiert diese für verschiedene Nutzergruppen und ist seit mehr als einem Jahr erfolgreich im produktiven Einsatz (Abbildung 34). In der Softwarearchitektur wird strikt zwischen dem betriebsabhängigen Teil, der Datenakquisition, und dem betriebsunabhängigen Teil, der Darstellung der Daten in geeigneter Form, unterschieden. Verschiedene Ansichten zeigen die Maschinendaten, die Gesamtanlageneffektivität (OEE), aufgeschlüsselt nach den einzelnen Maschinen, und die Prozessstabilität. Störfälle der produzierenden Druckgussmaschinen werden aufgelistet. Gemäß des im Projektantrag verankerten Paradigmas einer nutzerspezifischen Anzeige der Daten ist die Software, welche als verteilte Desktop-Anwendung realisiert ist, frei konfigurierbar. Durch die Bereitstellung der individualisierten Dashboards konnte die Produktionsplanung und die Instandhaltung verbessert werden, was zu einer Steigerung der Energieeffizienz beim Kooperationspartner geführt hat.



Abbildung 34: Digitales Produktionsabbild im industriellen Einsatz.

Aktuell wird eine Web-Applikation entwickelt, welche die Möglichkeit der Anzeige der Maschinendaten auf mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets bietet und auf Grund der strikten Trennung von Datenakquisition und Visualisierung parallel zur schon im industriellen Einsatz befindlichen Desktop-Lösung eingesetzt werden kann. Ein wesentlicher Vorteil dieser Lösung ist, neben der mobilen Anzeige, die stark verkürzten Aktualisierungszeiten und weitere Entwicklungsoptionen wie das Einrichten von eMail-Benachrichtigungen.

Die Bedeutung einer derartigen Anwendung wurde 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 in dem Fachausschuss Gießerei 4.0 ein, in dem der Bundesverband der Deutschen Gießereiunternehmen (BDG) Unternehmen Hilfestellung bei der digitalen Transformation geben möchte. Dazu hat der Arbeitskreis den *BDG-Kompass - Gießerei 4.0 (Entwicklungsschritte zur digitalen Produktion)* veröffentlicht, in dem anhand von Reifegradmodellen verschiedene Aspekte der digitalen Produktion beleuchtet werden.

Im Rahmen des Projektes mit dem Kooperationspartner pressmetall Gunzenhausen GmbH war der erste Schritt die Erfassung der nur verteilt vorliegenden Maschinendaten. Dadurch wurde die Basis für eine umfassende Datenanalyse geschaffen, in der Störfälle an den einzelnen Produktionsanlagen statistisch untersucht werden können. Mit dem am Kompetenzzentrum für Industrielle Energieeffizienz (KIEff) entwickelten Tool *Downtime Explorer* werden die Produktionsmaschinen, bei denen Fehler an bestimmten Maschinenteilen besonders häufig auftreten, ermittelt (Abbildung 35). Dies ermöglicht es dem Unternehmen, den technologischen Schritt von der Ausfallbehebung und zeitgesteuerten periodischen Instandhaltung zur zustandsorientierten Instandhaltung zu vollziehen, was zu einer höheren Produktivität und zu einer Steigerung der Energieeffizienz führt.

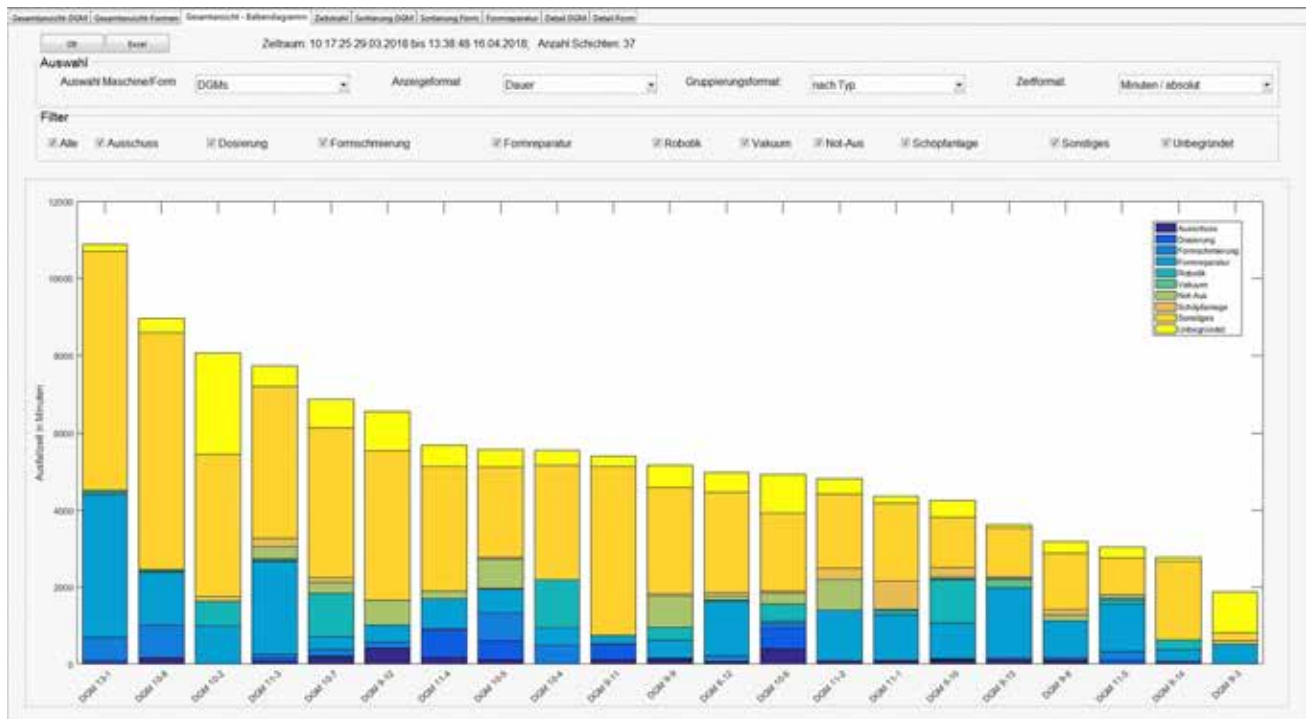


Abbildung 35: Ursachenspezifische Anzeige von Produktionsausfällen.

4.2 Intralogistische Energieeffizienzmaßnahmen

Um das Energie- und Kosteneinsparungspotential in der Aluminium-Druckgussindustrie zu verdeutlichen, wurden in dem Green Factory Bavaria-Projekt E|Melt die Auswirkung verschiedener intralogistischer Maßnahmen simulativ untersucht. Dazu wurden in einer hybriden Simulation der Materialfluss der kompletten innerbetrieblichen Lieferkette mit Flüssigaluminium (Abbildung 36) und die energetischen Prozesse in den Schmelzöfen abgebildet. Die Simulation ist so aufgebaut, dass nach Eingabe der Betriebsstruktur die Auswirkung von verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen für einen spezifischen Betrieb untersucht werden kann. Als Maßnahmen wurden die Vorwärmung des festen Materials durch den Abgasstrom der Öfen, die optimierte Beschickung der Schmelzöfen mit festem Material und die verbesserte Aluminiumverteilung auf die produzierenden Druckgussmaschinen untersucht.

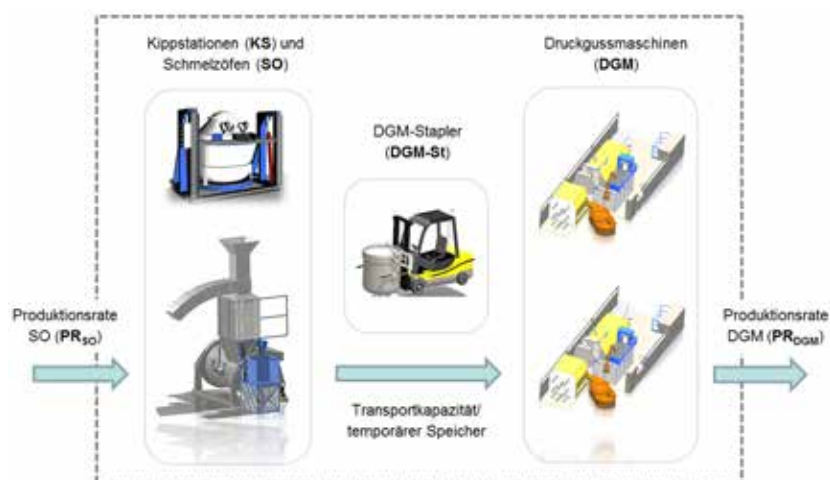


Abbildung 36: Innerbetriebliche Lieferkette des Flüssigaluminiums.

Die Simulation wurde anhand von Produktions- und Energiedaten von zwei unterschiedlich aufgebauten Betrieben (ZF Gusstechnologie GmbH und pressmetall Gunzenhausen GmbH) validiert. Dabei konnten erhebliche energetische Einsparpotentiale (Tabelle 2), eine Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität (OEE) und eine Erhöhung der Betriebssicherheit festgestellt werden. Anhand der Simulation ergibt sich für die deutsche Nichteisengussindustrie bei Anwendung der Effizienzmaßnahmen ein Einsparpotential von etwa 250 GWh thermisch und ca. 50 000 t CO₂.

Tabelle 2: Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen für unterschiedliche Betriebsgrößen.

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

Um die Ergebnisse in einfacher Weise der Industrie zugänglich zu machen, wurde ein Online-Demonstrator entwickelt (unter <https://www.hs-ansbach.de/emelt> verfügbar), mit dem der Nutzer nach Auswahl des Betriebes und den durchgeführten Maßnahmen den Erfolg hinsichtlich Energieeinsparung, Gesamtanlageneffektivität und Betriebssicherheit visualisiert bekommt (Abbildung 37).



Abbildung 37: Online-Demonstrator

Da zur Anpassung der Simulation an einen spezifischen Betrieb zahlreiche Betriebsparameter benötigt werden, die in mittelständischen Unternehmen nicht immer bekannt sind, wurde eine Simulation mit geringerem Detaillierungsgrad entwickelt. Damit lassen sich unter Kenntnis von wenigen Betriebsparametern bereits sehr genaue Aussagen hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Produktivität treffen. Durch den geringen Rechenaufwand kann die Simulation mit geringem Detaillierungsgrad auch in Smart Services eingesetzt werden, mit denen durch eine Vorhersage des Betriebsablaufes Prozesse, wie die Flüssigaluminiumversorgung der produzierenden Druckgussmaschinen, energieoptimiert erfolgen können.

4.3 Energieeffizienz durch Abwärmeverstromung

Das Aufschmelzen des festen Aluminiums im Schmelzofen benötigt 50 % des Energiebedarfs eines Druckgussbetriebes. Dabei entstehen große Mengen an Abwärme, die energetisch nicht genutzt 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. Daher wurde in Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Krcmar (Teilprojekt 1: Energieeffiziente Gebäudehülle) und Prof.

Dr. 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 thermischen Wärmespeicher vorsieht.

Das Anlagenkonzept erfordert die Entwicklung eines geeigneten Wärmespeichers und einer komplexen Regelungsstrategie. Aus verfahrenstechnischen Gründen soll die Abwärme in zwei Regeneratoren gespeichert und entladen werden. Eine erste Dimensionierung kann anhand der verfahrenstechnischen Parameter und der Schwankungsbreite des Abwärmestroms durchgeführt werden. Eine realistische Dimensionierung muss jedoch auch das dynamische Verhalten berücksichtigen. Daher wird eine komplexe Steuerung entwickelt, deren Betriebsparameter simulationsbasiert unter Berücksichtigung der Abgastemperaturen und der Massenströme bestimmt werden. Mit dieser Steuerung kann die vorab erfolgte Dimensionierung der Regeneratoren überprüft und verbessert werden. Erste Simulationen zeigen die Machbarkeit des Konzeptes (Abbildung 38).

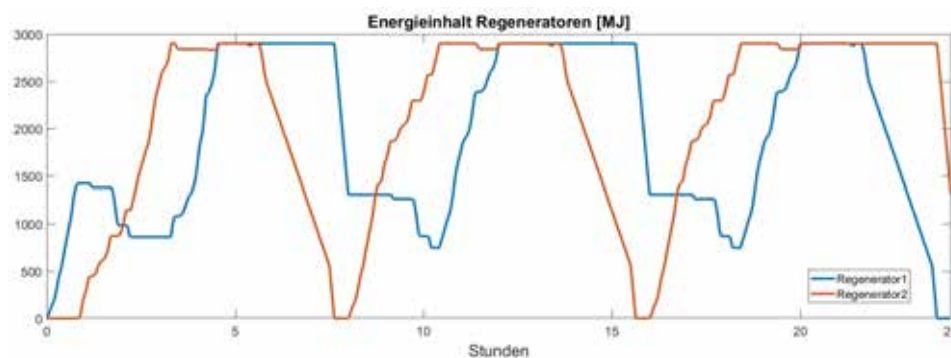


Abbildung 38: Thermischer Wärmespeicher zur Vergleichmäßigung des Wärmeangebotes.

4.4 Numerische Auslegung von Gussbauteilen entlang der Prozesskette

Im November 2019 erfolgte der Start des Verbundvorhabens *DNAGuss: Durchgängige numerische Auslegung von Gussteilen entlang der Prozesskette* im Rahmen des 7. Energieforschungsprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter der Projektleitung des Fraunhofer-Institutes für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, den Auslegungsprozess von Großgussteilen, insbesondere in der Windkraftindustrie, zu optimieren, in dem die genutzten Auslegungstools aus der Konstruktion, der Gießprozesssimulation, der Beanspruchungssimulation und der Simulation zur zerstörungsfreien Prüfung über Schnittstellen miteinander gekoppelt werden (Abbildung 39). Durch die durchgängige Auslegung wird eine schnellere und ressourcenschonendere Bauteilentwicklung ermöglicht. An dem Projekt beteiligt sind neben dem Fraunhofer LBF als Projektleitung, das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), verschiedene Softwareanbieter wie Magma Gießtechnologie GmbH als der weltweit führende Anbieter von Gießprozesssimulationen, Eisen-Großguss-Unternehmen und das Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz (KIEff) im Forschungsbereich Effizienz. Dem KIEff kommt dabei die Aufgabe zu, für den durchgängigen Informationsfluss entlang der Prozesskette zu sorgen. Dies stellt die informationstechnische Basis für das Gesamtvorhaben dar und ist für dessen Realisierung unumgänglich.

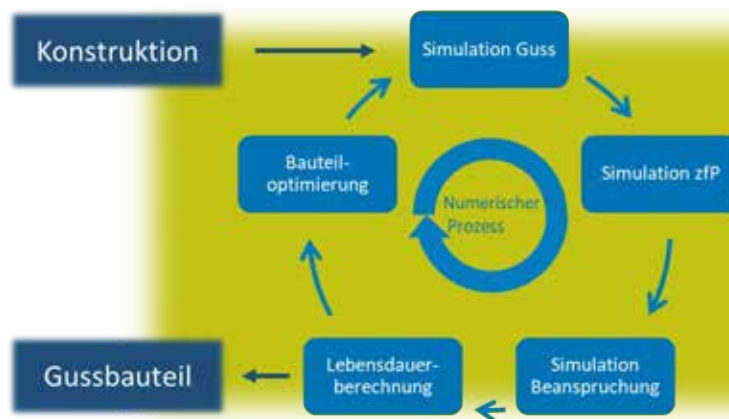


Abbildung 39: Durchgängige numerische Auslegung von Gussbauteilen.

4.5 Fachtagung Digitalisierung in der Gießereiindustrie

Auf der am 9. und 10. Oktober 2019 vom KIEff am Energiecampus Nürnberg veranstalteten Fachtagung suchten Experten aus Industrie und Wissenschaft eine Antwort auf die Fragen

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

Aufgrund der sehr langen Lebensdauer der Maschinen zeichnet sich die vorwiegend mittelständisch aufgebaute Gießereiindustrie durch einen geringen Automatisierungsgrad aus und es sind überzeugende Konzepte und Visionen notwendig, um die seit vielen Jahren etablierten Prozesse zu verändern. Dazu stellte der Tagungsleiter Prof. Dr. Schlüter die im Forschungsbereich EFFIZIENZ erarbeitete Roadmap zur Digitalisierung vor (Abbildung 40).

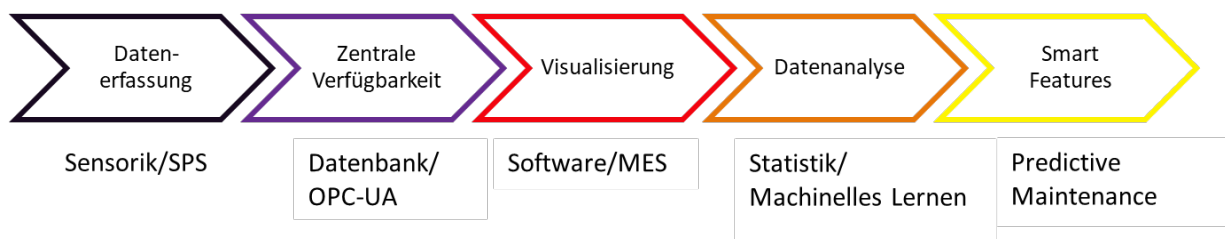


Abbildung 40: Roadmap zur Digitalisierung

Erfolgreich umgesetzte branchenspezifische Industrie-4.0-Lösungen zur Technologieoptimierung wurden u.a. von Dr. Thomas Beganovic von der VW Gießerei Braunschweig und Steffen Günther, Head of Business Development CAS/Foundry von Kuka Industries vorgestellt. Die Fachtagung wurde durch einen Besuch bei der Firma promeos GmbH in Nürnberg, die energieeffiziente Porenbrenner für den Schmelzbetrieb herstellt, abgerundet. In einem Nachbericht wurde die Tagung in der international renommierten Online Publikation SPOTLIGHTMETAL (Author: Isabell Glödtzsch, Title: Status Quo - Digitalization in the Foundry Industry, Date: 12.11.2019) ausführlich besprochen.

5 Strategische Entwicklung in der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Industrie“

Im Forschungsschwerpunkt „Energieeffiziente Industrie“ hat sich am EnCN ein interdisziplinäres Forscherteam der Technischen Hochschule Nürnberg und der Hochschule Ansbach gebildet. Das Team besteht aus den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Kremser und Prof. Dr. Dietz von der Fakultät Elektro- und Feinwerktechnik der TH Nürnberg und der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Schlüter von der Fakultät Technik der HS Ansbach (Abbildung 41). Unter der übergeordneten Thematik „Energieeffizienz mit Industrie 4.0“ stehen die Effizienzsteigerung elektrischer Antriebsstränge durch neue Regelungskonzepte, energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen und die Steigerung von Energieeffizienz durch intelligente Nutzung von Energiedaten im Fokus der Arbeitsaufgaben.

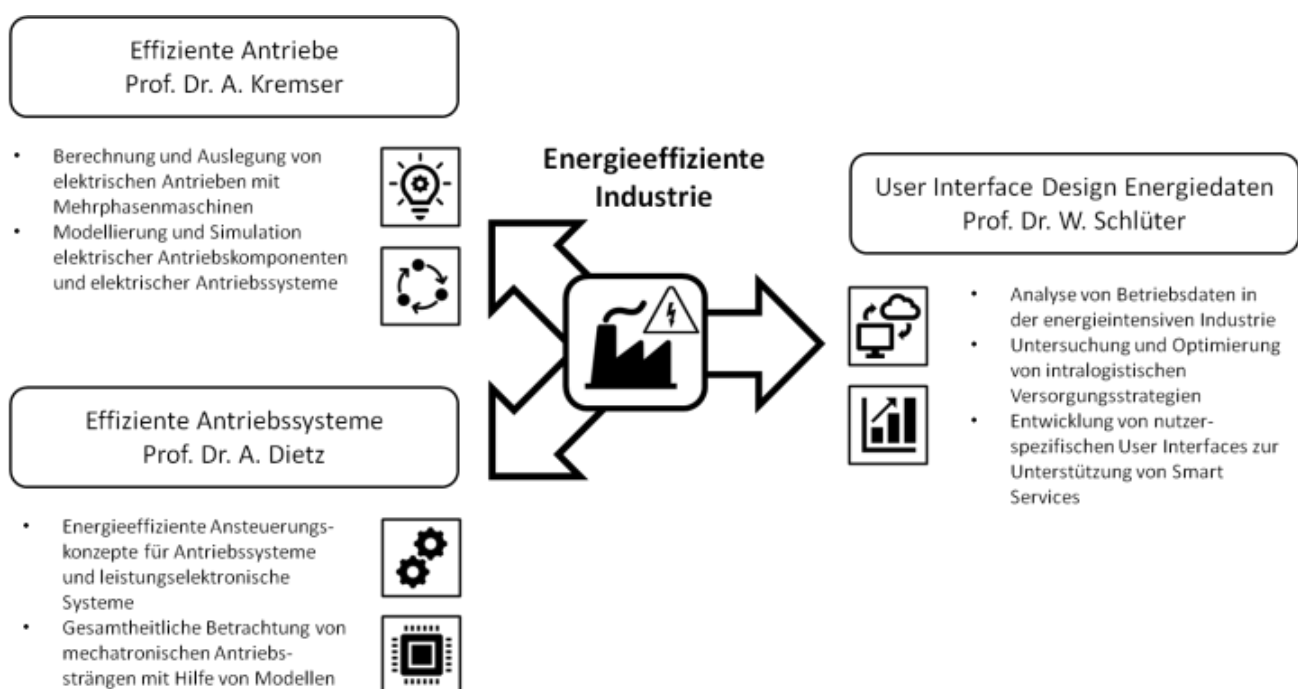


Abbildung 41: Interdisziplinäres Forscherteam des Forschungsschwerpunktes „Energieeffiziente Industrie“

5.1 Interdisziplinarität

Innerhalb des Forschungsteams zeigt sich die enge Vernetzung beispielsweise darin, dass die in TP2 untersuchte Mehrphasenmaschine mit einer in TP3 entwickelten modellprädiktiven Regelung betrieben werden soll. Die anschließende Bewertung kommt beiden Teilprojekten zugute. Da in TP3 und TP4 gleiche Softwarewerkzeuge benutzt werden, besteht diesbezüglich ein intensiver Austausch der Arbeitsgruppen. Gemeinsam werden neue Projektideen und Forschungsanträge generiert: Unter der Projektleitung von Prof. Dr. Schlüter erfolgt z.Zt. mit Prof. Dr. Dietz und der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Krcmar die Ausarbeitung eines neuen Forschungsantrags „ThermoPower - Abwärmeverstromung bei volatilen Abgasströmen in der energieintensiven Industrie“. Der Forschungsantrag soll beim 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ des BMWi eingereicht werden. Im ZIM-Kooperationsnetzwerk „mobi Inspec - Mobile Inspektion für die Energieversorgung der ENERGIEREGION Nürnberg“ wird aktuell der Projektantrag MegaAir mit dem Ziel der Weiterentwicklung einer Drohne für die Enteisung von Windkraftanlagen und die Überprüfung der Isolatoren bei 100 KW-Leitungen ausgearbeitet. Die strömungstechnische Optimierung der Flügelgeometrie ist Aufgabe der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Schlüter, während die Optimierung des Elektromotors durch die Arbeitsgruppe Prof. Dr. Dietz erfolgen wird. Dazu ist bereits ein hochschulintern finanziertes vorbereitendes Projekt an der TH-Nürnberg gestartet.



Abbildung 42: Workshop zur Erarbeitung des Konzeptes für das Projekt im ZIM-Kooperationsnetzwerk „mobi Inspec“

Das TP4 ist mit seiner Forschungstätigkeit eng mit dem ebenfalls von Prof. Dr. Schlüter geleiteten Kompetenzzentrum Strömungssimulation als Teil des EFRE-geförderten Transferzentrums für den Mittelstand an der HS Ansbach (TZM) verbunden. Aus dem Technologietransferzentrum für den Mittelstand (TZM) heraus wurde 2019 der Projektantrag TZM Smart & Green beim Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst gestellt und im Rahmen des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) bewilligt.

Ein Zusammenschluss aus Technischer Hochschule Nürnberg, der Technischen Universität München sowie der Universidad de Santiago de Chile arbeitet seit 2017 an der Entwicklung einer gemeinschaftlichen Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme. Unter der Leitung von Prof. Dietz wurde der gemeinsame Forschungsantrag „SEMIRA“ beim BMBF gestellt, welcher voraussichtlich ab April 2020, über eine Laufzeit von bis zu 5 Jahren, die Plattform vorantreiben wird.

5.2 Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchs

Durch kooperative Promotionen bestehen enge Forschungskontakte zu Universitäten und Forschungsinstituten:

- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Leistungselektronik
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewandlungstechnik
- Technische Universität München, Lehrstuhl für elektrische Systeme und Leistungselektronik
- Universität Kassel, Lehrstuhl Produktionsplanung und Fabrikorganisation
- Technische Universität Chemnitz, Lehrstuhl für Strömungsmechanik
- Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
- Fraunhofer-Institut für Keramik und Systeme IKTS

Aktuell wurden im Forschungsteam „Energieeffiziente Industrie“ 3 Promotionen abgeschlossen und eine weitere Dissertation eingereicht. Insgesamt 12 wissenschaftliche Mitarbeiter arbeiten zurzeit an ihrer Dissertation. Zahlreiche Masteranden, insbesondere aus dem hochschulübergreifenden, forschungsorientierten Masterstudiengang „Applied Research in Engineering“ und Bacheloranden erlernen im Forschungsteam die Grundzüge wissenschaftlichen Arbeitens.

5.3 Technologietransfer

Im Bereich Antriebstechnik (TP2 und TP3) wurden in der aktuellen Laufzeit Industrieprojekte wie „BlauPower - Transversalflossmaschine für Kleinwasserkraft“ und „präMa - Prädiktive Mehrphasenantriebe im Bereich Automotive“ akquiriert. Im Verbundprojekt „DNAguss - Durchgängige numerische Auslegung von Gussteilen entlang der Prozesskette“ erfolgt im TP4 die Zusammenarbeit mit zwei Fraunhofer-Instituten, führenden Softwareanbietern wie Magma Gießereitechnologie GmbH soft und produzierenden Unternehmen wie Heger Guss. Abbildung 43 zeigt einen Überblick über ausgewählte industrielle Kooperationspartner des Forschungsteams „Energieeffiziente Industrie“.



Abbildung 43: Industrielle Kooperationspartner des Forschungsteams „Energieeffiziente Industrie“

Die aktuellen Forschungsergebnisse der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Schlüter werden auf Fachausschusssitzungen des Transferpartners „Bundesverband der Deutschen Gießereiunternehmen“ (bdguss) und durch fortlaufende Veröffentlichungen in der führenden deutschsprachigen Fachzeitschrift GIESSEREI und der internationalen Fachzeitschrift Casting Plant and Technology International Fachkreisen bekannt gemacht. Die jährlich auf dem Energie Campus Nürnberg stattfindende zweitägige Fachtagung Digitalisierung in der Gießereiindustrie zeigt Zukunftsperspektiven für die in starker internationaler Konkurrenz stehende Branche auf. Das Forschungsteam „Energieeffiziente Industrie“ war auf den Messen EUROGUSS 2018, SPS - Smart Production Solution 2019 und EUROGUSS 2020 mit jeweils einem eigenen Messestand vertreten, um die industrienahen Forschungsergebnisse einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Industrie vorzustellen. Seit 2017 wurden 3 Patente angemeldet, wovon eines bereits erteilt und ein weiteres offengelegt wurde.

6 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 übergeht. Die Arbeitsgruppe war auch im Jahr 2019 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 31.12.2019 insgesamt 6.768.680 €. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und in neue Laborausrüstung investiert werden. Die Arbeitsgruppe bestand im Berichtszeitraum aus 26 Mitarbeitern zuzüglich den beteiligten Professoren und den Studierenden, die als studentische Hilfskräfte in den Projekten mitarbeiten. Es wird derzeit an laufenden F&E-Projekten gearbeitet; bewilligte neue Vorhaben wurden gestartet und an Neuanträgen und Publikationen wird ständig gearbeitet.

Mit erfolgreich eingeworbenen Drittmitteln für den Strukturaufbau der TH Nürnberg gelang der Arbeitsgruppe die Inbetriebnahme eines Sekretariats mit einer halbtägigen Teamassistentin im 3. OG von Gebäude 16 (auf AEG) 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 Jahr 2019 eine Doktorandin und drei Doktoranden erfolgreich promoviert.

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

7 Vorträge & Poster 2019

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Krcmar, W. and Allar, C.: „Pilot line for the production of extruded laboratory bricks“, Presentation at the EU-project „LightCoce“-Update Meeting, Brussels (07.03.2019).
- [5] Krcmar, W. and Allar, C.: „Pilot line for the production of extruded laboratory bricks“, Kick-off Meeting EU-project „LightCoce; University of Athens, Greece (23./24.01.2019).
- [6] 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).
- [7] 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.
- [8] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: „Künstliche und natürliche Werkstoffe als Speichermedien für spitzenlastfähige Hochtemperatur-Wärmespeicher“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöhlmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle / Saale (20.12.2017).

- [9] Hildebrand, J.S. und Krcmar, W.: „Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direktverdampferzeuger“; Vortrag EnCN-Jahreskonferenz 2019, Energie Campus Nürnberg (05.12.2019).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Sappa, D., Karsdorf, R. und Oeder, K.: „Ziegel 2020 – Ziegelentwicklung mittels Rapid Prototyping“; Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg (Dezember 2019).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Krcmar, W.: „Highly heat insulating building materials“; Vortrag anlässlich Workshop „Wallonia meets Energy Campus Nuremberg, Ottignies-Louvain-la-Neuve, Belgien, 08.-10.12.2019.
- [17] M. Braun; F. Hoga. OPV in der Fassadentechnik. EnCN Jahreskonferenz, 2019.
- [18] Grün, G.: 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.
- [19] Grün, G.: Fassadenintegrierte PV, FVHF Impulse für Partnerschaften "Zwei", Valley, 7.5.2019.
- [20] Grün, G.: Rahmenbedingungen für Smarte Gebäude, Berliner Energietage 2019, Berlin, 21.5.2019.
- [21] Grün, G.: Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor: Technische und wirtschaftliche Herausforderung, München, 18.9.2019.
- [22] Grün, G.: Development of Energy Efficiency in the Building Sector in Germany and its Contribution towards a Carbon Neutral Building Stock, Dalian, 14.10.2019.
- [23] Dentel, A., Betzold, C., Stephan, W. (2019). Smart Operation Strategies for Heat Pumps in Dwellings. Vortrag anlässlich der 16th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2019, Rome, Italy.
- [24] Betzold, C., Dentel, A. (2019). PV Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding PV Self-Consumption. Vortrag anlässlich der 16th International IBPSA Building Simulation Conference 2019, Rome, Italy.
- [25] Harhausen, G. (2019). Vortrag anlässlich Netzwerktreffen / Projektakquise für EU Projektanträge, Delegationsreise Belgien, Provinz Wallonien, „Wallonia meets Energy Campus Nürnberg“, 08.-10.12.2019, Brüssel, Belgien.
- [26] Bordin, S. (2019). Fassade³ - Komponentenvorstellung; Vortrag anlässlich der Seminarreihe „Lebendige Baustelle- Fachvorträge und Projektbesichtigung (2019)“, 18.10.2019, Nürnberg, Deutschland.
- [27] R. Steckel. Multi-Phase Machines for High-Power, Low-Voltage Applications. EM Summer School, Universität Wuppertal, 2019. R. Steckel. Algebraic Design of Symmetrical Multi-Phase Windings with Even and Odd Number of Phases. Wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Energietechnik und Elektromobilität, Schweinfurt, 2019.
- [28] L. Rabenstein. Analytical calculation of a transverse flux machine. Wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Energietechnik und Elektromobilität, Schweinfurt, 2019.
- [29] D. Jagosz. Numerische und messtechnische Untersuchungen von Stromverdrängungseffekten in Statorwicklungen. Wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Energietechnik und Elektromobilität, Schweinfurt, 2019.
- [30] A. Ackva, A. Dietz, M. Hoerner, S. Raab. The importance of an overall system simulation for branched high-voltage vehicle electrical systems. E-MOTIVE 11. Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe, Schweinfurt, 2019.
- [31] A. Ackva, A. Dietz, M. Hoerner, S. Raab. Modulares Simulationswerkzeug zur Analyse dynamischer Vorgänge in Hochvolt Bordnetzen. Haus der Technik Tagung Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Würzburg, 2019.
- [32] T. Schindler. Selbstlernende Kompensation des Drehzahlrippels von PMSM unter exzentrischen Lastbedingungen. Wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Energietechnik und Elektromobilität, Schweinfurt, 2019. T. Schindler. Reinforcement Learning in der Antriebstechnik. Automation Day 2019: Künstliche Intelligenz im industriellen Einsatz, Nürnberg, 2019.
- [33] F. Pöhlau, A. Dietz, B. Wagner. Future Mobility, efi-Kolloquium, Nürnberg, 2019.
- [34] A. Kremser. Produktion elektrischer Antriebe, WGP Seminar, Nürnberg, 2019.

- [35] A. Dietz. Dynamische Belastung des DC-Zwischenkreises bei Elektrofahrzeugen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, 2019.
- [36] J. Dettelbacher: Simulative Untersuchung von Aluminium-Druckgussbetrieben anhand von Modellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. EnCN Jahreskonferenz. Energiecampus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [37] F. Mielke: Webbasiertes Prozessmonitoring für einen Druckgussbetrieb. EnCN Jahreskonferenz. Energiecampus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [38] J. Dettelbacher: Energieeffizienz durch Simulation. Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energiecampus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [39] F. Mielke; C. Mack: Transparente Produktion durch Online-Visualisierung des Gussbetriebes. Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energiecampus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [40] W. Schlüter: Digitalisierung als Schlüsseltechnologie für den Gussbetrieb der Zukunft. FAPS IPC Fachseminar Digitalisierung in der Gießerei. Energiecampus Nürnberg. Nürnberg, 2019.
- [41] J. Dettelbacher; W. Schlüter: Material- und Energieflusssimulation in Aluminium-Druckgussbetrieben. Posterpräsentation Matlab Expo. MathWorks. München, 2019.
- [42] D. Wagner; W. Schlüter: Nutzung des ADM-Modells zur Optimierung des Methanflusses in Biogasanlagen. Posterpräsentation Matlab Expo. MathWorks. München, 2019.
- [43] M. Gröper; D. Wagner: Modellprädiktive Regelung von Biogasanlagen durch mechanistische Modelle und maschinelles Lernen. Posterpräsentation Bioenergieforum Rostock. Universität Rostock. Rostock, 2019.
- [44] W. Schlüter (2019): Abwärmeverstromung in der Aluminium-Gussindustrie. Plenarsitzung des Fachausschusses Druckguss des BDG. 19. Druckgusstag. Schorndorf, 2019.

8 Veröffentlichungen 2019

- [1] E. Kränzlein, E.; Harmel, J., Pöhlmann, H. und Krcmar, W.: Influence of the Si/Al ratio in geopolymers on the stability against acidic attack and the immobilization of Pb^{2+} and Zn^{2+} ; J. Construction and Building Materials, 227/10.12.2019, ELSEVIER.
- [2] Datsyuk, V., Trotsenko, S., Höflich, K., Kebelmann, K., Wedel, N., Allar, C., Deinhart, V., Schartel, B., Reich, S. und Krcmar, W.: "Sustainable Nanofiber Building Insulation Materials", J. Advanced Materials Technologies, Verlag Wiley (im Dezember 2019 zur Publikation eingereicht).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Braun, M. und Kießling, G.: „EnCN-Vorstudien zur Gestaltung einer elektrisch aktiven Fassade“; Jahresbericht 2019 Fakultät efi (Best of efi) 2018/2019.
- [7] G. Grün: Integrierte Systeme Planen; in: Deutsche Bauzeitschrift DBZ, 01/2019.
- [8] Dentel, A., Betzold, C., Herterich, T. (2019). Smarte Regelstrategien für Wärmepumpen in Wohngebäuden, Ingenieurspiegel, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur mbH GmbH, Bingen.
- [9] Dentel, A., Betzold, C., Stephan, W. (2019). Smart Operation Strategies for Heat Pumps in Dwellings. Beitrag im Konferenzband zur 16th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2019, Rome, Italy.
- [10] Betzold, C., Dentel, A. (2019). PV Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding PV Self-Consumption. Beitrag im Konferenzband zur 16th International IBPSA Building Simulation Conference 2019, 2019, Rome, Italy.
- [11] R. Steckel; S. Daum; A. Kremser and H.G. Herzog. Efficiency Analysis of Three-Phase and Dual Three-Phase Induction Machine with Sinusoidal Supply. IEEE International Electric Machines & Drives (IEMDC), 2019.
- [12] J. Bruckschlögel, J. Germishuizen, and A. Kremser. Design Optimisation of IPM Machines Considering the Constant Power Range. 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), 2019.
- [13] M. Reinlein, M. Regnet, P. Szary, U. Abele und A. Kremser. Semi-analytical and numerical calculation of a great number of induction machines taking into account cutting edges. IKMT 2019 - Innovative small Drives and Micro-Motor Systems; 12. ETG/GMM-Symposium, Würzburg, 2019.

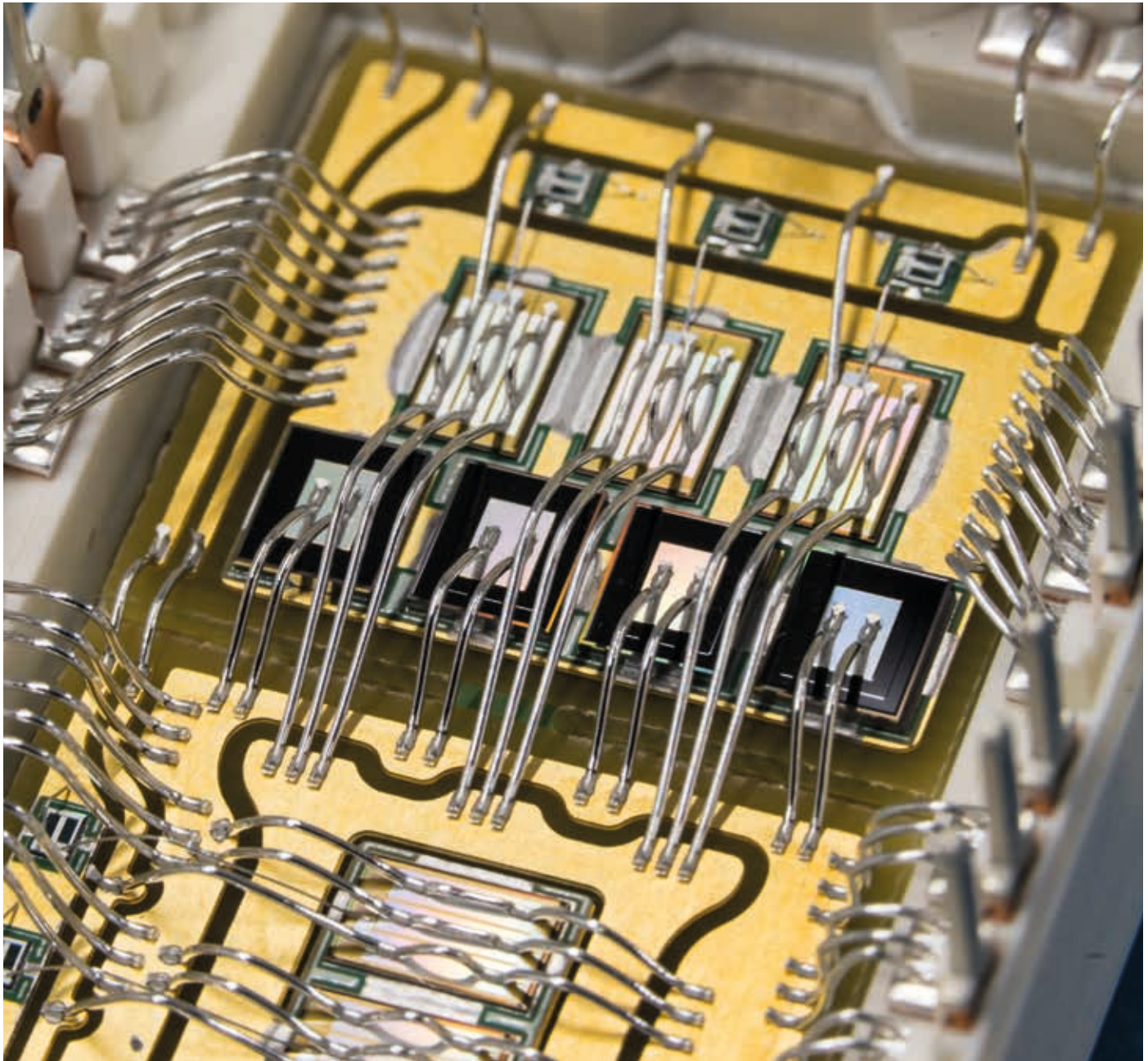
- [14] M. Reinlein, M. Regnet, P. Szary, U. Abele und A. Kremser. Impact of different cutting methods on core losses and magnetizing demand of electrical steel sheets. IKMT 2019 - Innovative small Drives and Micro-Motor Systems; 12. ETG/GMM-Symposium, Würzburg, 2019.
- [15] M. Regnet, M. Reinlein, P. Szary, U. Abele und A. Kremser. Influence of Cutting Tool Wear on Core Losses and Magnetizing Demand of Electrical Steel Sheets. 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Esslingen, 2019.
- [16] S. Wendel, A. Geiger, E. Liegmann, D. Arancibia, E. Duran, T. Kreppel, F. Rojas, F. Popp-Nowak, M. Diaz, A. Dietz, R. Kennel, B. Wagner. UltraZohm - a Powerful Real-Time Computation Platform for MPC and Multi-Level Inverters. IEEE 5th International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Mai 2019.
- [17] S. Wendel, P. Karamanakos, A. Dietz, R. Kennel. Operating Point Dependent Variable Switching Point Predictive Current Control for PMSM Drives. IEEE 5th International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Mai 2019.
- [18] S. Wendel, B. Hauke-Korber, A. Dietz, R. Kennel. Experimental Evaluation of Cascaded Continuous and Finite Model Predictive Speed Control for Electrical Drives. IEEE 21th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe), Sep. 2019.
- [19] M. Gerstner, M. Maerz, A. Dietz. Experimental Comparison of DC/DC Converters for Wide Input Voltage Ratio Applications. 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON, Oct. 2019.
- [20] T. Schindler, L. Foss und A. Dietz. Comparison of Reinforcement Learning Algorithms for Speed Ripple Reduction of Permanent Magnet Synchronous Motor. Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik: Beiträge der 12. ETG/GMM-Fachtagung, 10.-11. September 2019 in Würzburg, Berlin: VDE Verlag, 2019.
- [21] 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 (Co-Produktion THN, ZAE Bayern, FAU Erlangen).
- [22] J. Dettelbacher, W. Schlüter: Simulative Untersuchung von Betriebserweiterungen in einem Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetrieb anhand von Modellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. ASIM-Treffen STS/GMMS 2019. Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM. Braunschweig, 2019.(B)
- [23] J. Dettelbacher; W. Schlüter: Bewertung von Energieeffizienz-Maßnahmen in Aluminium-Druckgussbetrieben durch Simulation. In: *Giesserei* 2019 (106).(B)
- [24] J. Dettelbacher, W. Schlüter: 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. Simulation in Produktion und Logistik. Chemnitz, 18.-20.09.2019. ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten, S. 509–517.(A)
- [25] J. Dettelbacher; W. Schlüter: 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. Unter Mitarbeit von Umut Durak, Christina Deatcu und Jan Hettwer. ASIM Workshop 2019. Braunschweig, 21.-22.02.2019. ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation. Braunschweig (ARGESIM Reports), S. 53–58.(A)
- [26] K. Zacharias; W. Schlüter (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. Unter Mitarbeit von Umut Durak, Christina Deatcu und Jan Hettwer. ASIM Workshop 2019. Braunschweig, 21.-22.02.2019. ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation. Braunschweig (ARGESIM Reports), S. 35–40.(A)
- [27] J. Dettelbacher; W. Schlüter: "Using Simulation for the Evaluation of Energy Efficiency Measures in Aluminum"; Die Casting Plants. Hg. v. Isabell Page. Spotlight Metal. Online verfügbar unter <https://www.spotlightmetal.com/using-simulation-for-the-evaluation-of-energy-efficiency-measures-in-aluminum-die-casting-plants-a-853543/>, zuletzt geprüft am 12.01.2020.(B)
- [28] J. Krieg; W. Schlüter: Equipped for the Future with a Digital Production Image. Hg. v. Isabell Page. Spotlight Metal. Online verfügbar unter <https://www.spotlightmetal.com/equipped-for-the-future-with-a-digital-production-image-a-825101/>, zuletzt geprüft am 12.01.2020.(B)
- [29] F. Mielke; W. Schlüter: Revision of a Matlab Production Monitoring System for the Aluminum Die-Casting Industry. In: Clemens Klippel, Jürgen Mottok und Marcus Reichenberger (Hg.): Applied Research Conference 2019. ARC 2019. Applied Research Conference 2019. Regensburg, 08.07.2019. OTH Regensburg, S. 563–570.(C)

9 Patente

- [1] 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).
- [2] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Internationale Patentanmeldung (PCT), WO 2019 / 105877 A1 (06.06.2019).
- [3] P. Löhdefink; A. Dietz: „Antriebssystem zum elektromechanischen Antreiben eines mehrspurigen Fahrzeugs sowie entsprechendes mehrspuriges Fahrzeug“, Deutsche Patentanmeldung der Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, DE4134240C2.
- [4] 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.
- [5] 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, Anmeldenummer EP18190294.1.

FORSCHUNGSBEREICH

Energiemanagement-Technologien



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
martin.maerz@fau.de

Telefon
+49 911 / 56854 9310

Web
www.encn.de/EMT

Lehrstuhl für Leistungselektronik

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

Projektbericht 2019

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik - LEE (vormals Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik) 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.

Im Fokus des Lehrstuhls LEE steht mit der Leistungselektronik DIE Schlüsseltechnologie für das elektrische Energiemanagement. Leistungselektronik steuert und wandelt elektrische Energie und findet sich in vielfältigster Weise entlang der gesamten Energiekette wieder. Leistungselektronik ist damit Grundvoraussetzung für eine intelligente und effiziente Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie.

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

KONTAKT

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

Fraunhofer IISB



E-Mail
martin.maerz@fau.de

Telefon
+49 911 / 568554 – 9310

Web
www.lee.tf.fau.de



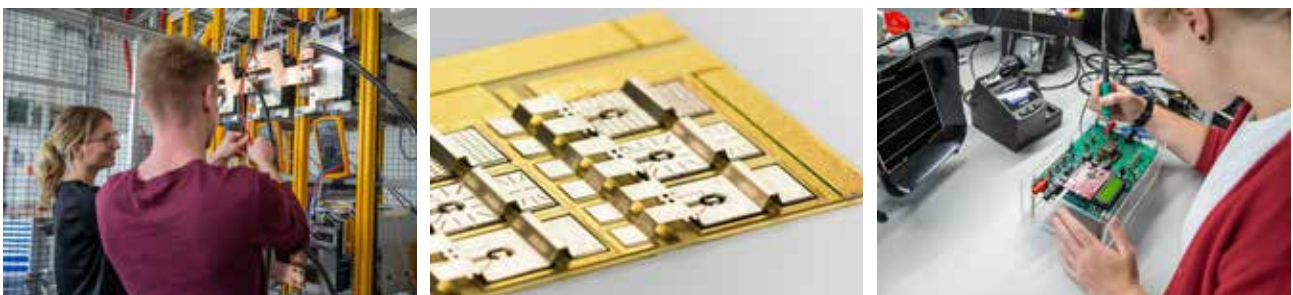
Der Lehrstuhl LEE kooperiert sehr eng mit dem Fraunhofer-IISB, das ebenfalls mit einer Arbeitsgruppe am Energie Campus Nürnberg vertreten ist. Das IISB betreibt am Hauptsitz in Erlangen ein energietechnisches Reallabor in der Dimension eines kleinen Industrieunternehmens. Die Bereitstellung von Kälte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

Darüber hinaus kooperieren der Lehrstuhl LEE und der Geschäftsbereich Energiemanagement-Technologien des EnCN sehr eng mit dem Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE), einer Initiative der FAU und der beiden Fraunhofer Institute IIS und IISB, mit dem bayerischen Cluster Leistungselektronik sowie - auch im Rahmen kooperativer Promotionen - mit den Hochschulen Nürnberg (GSO) und Coburg.

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

Der Luftverkehr trägt heute mit etwa 2% zu den vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen bei. 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 an Energiespeicherlösungen mit sehr hoher Energie- und Leistungsdichte. Daran arbeitet ein internationales interdisziplinäres Expertenkonsortium, darunter Mitarbeiter des Lehrstuhls LEE. Deren Aufgabe ist es, unter Berücksichtigung einschlägiger Luftfahrtnormen, ein hochzuverlässiges Batterie-Management-System (BMS) sowie innovative leistungselektronische Wandler für das Energiemanagement an Bord zu entwickeln.



Im Rahmen des EU-Projekts „CONNECT“ erforscht der Lehrstuhl LEE gemeinsam mit der RWTH Aachen, der Infineon AG und weiteren Partnern neuartige DC/DC-Wandler mit sehr hoher Energieeffizienz sowie neuartige, in Leistungselektronik integrierbare Schutz- und Überwachungsfunktionen für Batteriesysteme.

Das Lehrangebot des Lehrstuhls umfasst aktuell die Vorlesungen

- Leistungselektronik (Teil 1) - Grundlagenvorlesung
- Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang
- Leistungselektronik für dezentrale Energieversorgung – Gleichspannungsnetze
- Thermisches Management in der Leistungselektronik,

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



In 2019 wurden über den Lehrstuhl LEE 43 studentische Abschlussarbeiten betreut. Darunter die Masterarbeit von Herrn Simon Quergfelder mit dem Titel „Inbetriebnahme eines 3-Level-Umrichters zur Untersuchung verschiedener Ansteuerungsverfahren und deren Einfluss auf Stromqualität und Spannungssymmetrie“, die den EnCN-Energiepreis 2019 in der Kategorie Energiemanagement-Technologien erhielt. Das Paper „A bidirectional and isolated DC/DC converter connecting mobile battery systems to a DC grid in commercial buildings“ wurde mit dem „Best Paper Award“ auf der IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC) 2019 in Singapur ausgezeichnet. Herr Otto Kreutzer (FhG IISB) erhielt nach seiner Promotion in 2019 einen Ruf auf die Professur für „Grundlagen der Elektrotechnik und Leistungselektronik“ an der Hochschule Deggendorf.



Abbildung 1: Mit unseren Forschungsarbeiten eröffnen wir der Leistungselektronik völlig neue Anwendungsfelder, dazu zählt unter anderem die Luft- und Raumfahrt mit ihren extremen Einsatzbedingungen.

Vorträge 2019

- [1] Kaiser J., Strobl C., Mann H., Muhm H., Klimpel M., Schork F., März M.: *Verbundprojekt „DC-Schutzorgane“ – Entwicklung eines neuen, integrierten Schutzkonzepts und neuer Schutzorgane für zukünftige Niederspannungs-Gleichstromnetze*. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, October 2019
- [2] Heckel T.: *Measurement of Fast-Switching Operation with Wide Bandgap Transistors*. ECPE Tutorial: Testing and Electrical Characterization of Power Semiconductor Devices, 13.02.2019
- [3] Heckel T., Lukaschik A.: *Thermal Measurements II, Thermal Engineering of Power Electronic Systems Part I: Thermal Design and Verification*. ECPE Seminar, 10.07.2019, Nuremberg
- [4] März M.: *Leistungshalbleiter – Eigenschaften und Ansteuerung*. Cluster-Schulung Getaktete Stromversorgungen – Grundlagen, 3. April 2019, Nürnberg
- [5] März M.: *Leistungselektronik für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. AutoUni, Kassel, 9. Mai 2019
- [6] März M.: *Mobilität von morgen – Herausforderungen, Fakten Perspektiven*. DRIVE-E Akademie 2019, Erlangen, 16.-22. September 2019
- [7] März M.: *Gleichstromnetze – dezentrale Energiesysteme effizient vernetzen*. Lange Nacht der Wissenschaften, Nürnberg 19. Oktober 2019
- [8] März M.: *Leistungselektronik für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. AutoUni, Kassel, 13. Nov. 2019
- [9] März M.: *Vorteile von Gleichstromnetzen*. Seminar „Gleichstromnetze in Industrie und Rechenzentren“, Erlangen, 28. November 2019
- [10] März M.: *Schnelles Schalten und ausgewählte Anwendungsprobleme*. Cluster-Schulung „Ansteuer- und Schutzschaltungen für MOSFET und IGBT“, Nürnberg, 3. Dezember 2019

Publikationen 2019

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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 (ISAPP2019)
- [5] 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
- [6] März M., Öchsner R.: *Innovative Technologien für intelligente dezentrale Energiesysteme*. Buch, 1. edition Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2019, ISBN: 978-3-8396-1486-0
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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

- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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*. 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe, Art. No. 8914806, DOI: 10.23919/EPE.2019.8914806
- [19] 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 IFECC 2019, Singapore, November 2019
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] Kaiser J., Weiß R., Burk J.: *DC Microgrids for Commercial or Industrial Buildings*. Bodo's Power Systems, April 2019

Erfindungsmeldungen, Patente 2019

- [1] Malipaard D., Ruccius B., Maerz M.: *Current converter circuit*. US 2019/0165693 A1 (May 30,2019)
- [2] Schwanninger R., Angerer M., Maerz M.: *Aktiver Filter zur Filterung von Gleichtaktstörungen*. Offenlegungsschrift DE 10 2018 114 861 A1

Promotionen 2019

- [1] Otto Kreutzer: *Untersuchungen zu nichtisolierenden bidirektionalen Hochvolt Hochvolt-DCDC-Wandlern mit Leistungsdichten jenseits von 100 kW/dm³ auf Basis von SiC-Bauelementen.*
- [2] Martin Trautmann: *Untersuchung einer neuartigen Kommunikationsmethode für induktive Leistungsübertragungssysteme*
- [3] Erik Fischer: *Entwicklung und Verifikation eines messtechnischen Verfahrens zur orts aufgelösten Evaluierung dielektrischer Eigenschaften von Energieversorgungskabeln*
- [4] Aaron Hutzler: *Untersuchungen zur Lastwechselfestigkeit von Halbleiteranbindungen unter Hochtemperaturbelastung*
- [5] Christopher Joffe: *Modellbasierter Entwurf und Charakterisierung eines induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge*
- [6] Leopold Ott: *Modellbasierte Stabilitätsuntersuchungen in Niederspannungs-DC-Verteilnetzen*
- [7] Uwe Waltrich: *Optimierung von Hochspannungsleistungsmodulen für modulare Multilevel-Topologien unter Berücksichtigung von Lebensdaueraspekten*
- [8] Michael Steinberger: *Verstromung von wasserstoffreichen Gasgemischen mit PEM-Brennstoffzellen am Beispiel einer Epitaxieanlage*
- [9] Philipp Puls: *Simulationsgestützte Effizienzoptimierung von industriellen Kaltwassersystemen mit thermischen Speichern*

Abschlussarbeiten 2019

- [1] Heusinger F.: *Untersuchung und Weiterentwicklung einer OCV-Messzelle zur Bestimmung des SOC-Wertes von Redox-Flow-Batterien.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [2] Schey S.: *Herstellung von elektrooptischen Modulatoren mittels Nanoimprintlithographie.* Masterarbeit
- [3] Castaño, A.: *Aufbau eines Simulationsmodells zur Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens von LOHC-Systemen mit Brennstoffzelle und Batterie.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [4] Becker T.: *Charakterisierung von tiefen Störstellen nach Implantation von Aluminium in n-Typ 4H-Siliziumkarbid.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [5] Stammberger F.: *Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines LOHC-basierten Energiespeichers.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [6] Brückner K.: *Bewertung, Entwicklung und Optimierung der Trockenätzeneigenschaften von Siliziumkarbid zur Herstellung von Leistungshalbleiterbauelementen mit Grabenstruktur.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [7] Märkl M.: *Klassifizierung elektrischer Lastspitzen im Energiesystem mittels maschineller Lernverfahren.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [8] Fröhling O.: *Untersuchung der Topologie des Dual-Invers-Wandlers als AC-Frontend mit PFC-Funktionalität.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [9] Grunenberg L.: *Development of reliable battery monitoring electronics for electric gliders.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [10] Groccia M.: *Simulative Auslegung eines leistungselektronischen Modullayouts bei automatischer Topologieerstellung unter Zielparameteroptimierung.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [11] Zhang, Xi: *Funktionale und sicherheitstechnische Systemanalyse einer Hubwerksapplikation mit Ableitung der optimalen Umrichterparametrierung.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [12] Hager J.: *Entwicklung und Auslegung einer Entladeschaltung für das HV-Netz in Kraftfahrzeugen.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [13] Kuratov R.: *Entwicklung und Aufbau eines 50 kW HF-Transformators mit hoher Isolationsspannung.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [14] Urban S.: *Untersuchungen zu halbleiterbasierten Gleichspannungsschaltern.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [15] Lutz M.: *Entwicklung von Berechnungswerkzeugen für die elektrisch-thermische Simulation.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [16] Sippel M.: *Entwicklung und Verifikation eines Sicherungsmodells in SPICE.* Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März

- [17] Ghasri A.: *EMV-Untersuchungen an einem bidirektionalen isolierenden DC/DC-Wandler*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [18] Jung S.: *Steuerung eines mehrphasigen, sensorlosen DC/DC-Wandlers mittels Valley-Switching*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [19] Händler N.: *Untersuchungen zur thermischen Optimierung eines Steckverbinders für das Hochleistungs-DC-Laden*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [20] Schleippmann N.: *Entwicklung eines bidirektionalen, isolierenden Hilfsspannungsnetzteiles*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [21] Quergfelder S.: *Inbetriebnahme eines 3-Level-Umrichters zur Untersuchung verschiedener Ansteuerverfahren und deren Einfluss auf Stromqualität und Spannungssymmetrie*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [22] Tientcheu Y.M.: *Entwicklung einer Steuerelektronik für die sensorlose Regelung eines permanenterregten Synchronmotors*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [23] Paulus W.: *Aufbau einer Schutzschaltung für Hochleistungs-DC-Quellen und elektronische Lasten*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [24] Ngonga E.: *Charakterisierung von Ansteuer-ICs für den Betrieb von permanenterregten Synchronmotoren*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [25] Westermann R.: *Weiterentwicklung der Regelung eines modularen Multilevel-Umrichters für Active-Front-End Anwendungen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [26] Ilg S.: *Analytische, simulative und messtechnische Bestimmung der Stromdichte in Flächenleitern*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [27] Lau S.: *Untersuchungen zur Notwendigkeit einer galvanischen Trennung in DC-Schnellladesystemen für Elektrofahrzeuge*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [28] Hauner T.: *Entwicklung eines Netzteils mit hoher Effizienz über einen weiten Lastbereich*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [29] Richter N.: *Flexible HV-Architektur für Elektrofahrzeuge*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [30] Fuchs M.: *Entwicklung eines Batteriemanagementsystems für den Luftfahrtbereich*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [31] Weitz N.: *Untersuchungen zur Leistungsdichte von PFC-Drosseln unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kernmaterialien und Schaltfrequenzen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [32] Hofmann C.: *Einzeltemperaturüberwachung bei parallel-geschalteten Leistungshalbleitern durch Einsatz schaltbarer Induktivitäten*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [33] Lu Y.: *Analyse eines bidirektionalen isolierenden Gleichspannungswandlers hinsichtlich weichen Schaltens*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [34] Hofmann A.: *Kompaktmodelle für SiC-MOSFET*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [35] Bogendörfer O.: *Thermische Modellierung eines elektrischen Antriebssystems zur Ermittlung lokaler Temperaturkollektive in Leistungselektronik und E-Motor*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [36] Meier A.: *Untersuchung von Stabilitäts- und Fehlerszenarien in Gleichstromnetzen durch KI-Verfahren*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [37] von der Marwitz R.: *Isolationssysteme für Leistungselektronik in Luftfahrtanwendungen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [38] Freimuth S.: *Simulative Untersuchung verschiedener Regelungsansätze für elektrische Antriebe*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [39] Kroker P.: *Entwicklung der Regelung eines Modularen-Multilevel-Umrichters (MMC) im Betrieb als Antriebsumrichter für Drehstrommaschinen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [40] Conrad M.: *Entwicklung eines induktiven Heizsystems für einen Hochtemperatur-Werkstoffprüfstand*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [41] Dong Y.: *Stabilitätsanalyse eines industriellen LVDC-Verteilnetzes*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [42] Königer I.: *Untersuchung der leitungsgebundenen Störemissionen eines B6-BLDC-Umrichters und Optimierung anhand einer Kühler-Lüfter-Applikation*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [43] Schneider J.: *Auslegung und Optimierung eines Kühlsystems für Lasersysteme*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [44] Schuhmann E.: *Erstellung eines elektrisch-thermischen Simulationsmodells für SiC-MOSFET zur Bestimmung der Schalt- und Leitverluste bei Zero-Voltage-Switching*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März

- [45] Kaufmann J.: *Entwicklung eines Weitbereichs-Hilfsspannungsnetzteils für Eingangsspannungen bis 1 kV*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [46] Zhen T.: *Entwicklung einer Strategie zur optimierten Nutzung der Modulationsfreiheitsgrade in einem Dual Active Bridge Converter*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [47] Schmittner F.: *Entwicklung und Charakterisierung einer kurzschlussfesten Halbbrücke auf Basis neuartiger Galliumnitrid-Leistungshalbleiter*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [48] Fertig F.: *Bewertung unterschiedlicher Rotordesigns einer PM-Synchronmaschine für einen Fahrzeugantriebsstrang*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [49] Semmler B.: *Summenstromschätzung mittels rekonstruierter Phasenströme*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [50] Mayerhöffer M.: *Entwicklung und Implementierung eines Beobachters zur Bestimmung der Magnettemperatur einer permanentmagneterregten Synchronmaschine*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [51] Windisch J.: *Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus zur Charakterisierung von Leistungswandlern bei sehr tiefen Temperaturen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [52] Müller P.: *Si/GaN-Hybridumrichter für Automotive-Traktionsantriebe*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [53] Yang C.: *Untersuchungen zum Einfluss der Schaltfrequenz auf die Magnetverluste in einer PM-Synchronmaschine mit segmentierten Magneten*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [54] Steinmüller S.: *Untersuchungen zur Parallelschaltung von Netzstromrichtern am Beispiel eines 3L-GaN Umrichters*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [55] Ye O.: *Entwicklung eines Regelungsmodells für seriell-/parallelverschaltete Dual-Active-Bridge Converter*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [56] Chen S.: *Bildbasierte Generierung thermoelektrischer Simulationen zur Analyse von Leiterbahnen*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März
- [57] Kemayou F.: *Simulation und Aufbau eines LLC-Konverters mit zusätzlicher Sekundärwicklung*. Masterarbeit, Betreuer Prof. M. März

W1-Professur „Energieinformatik“

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

1 W1-Professur „Energieinformatik“

Die Besetzung der W1-Professur für Energieinformatik erfolgte bereits Anfang 2016 durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner. Im Jahr 2019 wurde die Bearbeitung von Projekten in den Forschungsschwerpunkten Energiesystemanalyse, Netzintegration Elektromobilität und Steuerung von intelligenten Energiesystemen mittels Methoden des Maschinellen Lernens fortgeführt.

1.1 Energiesystemanalyse

Im Bereich der Energiesystemanalyse wurde das BMWi-geförderte Projekt „KOSiNeK - Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext“ Ende 2019 abgeschlossen. Die im Jahr 2018 begonnene Implementierung des detaillierten Marktmodells konnte im Teilprojekt Simulation abgeschlossen werden. Ein anschließender Vergleich mit verschiedenen Kraftwerkseinsatzmodellen (Merit Order, Unit Commitment Problem) wurden durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Schnittstellen zu den weiteren Teilprojekten Optimierung und Netzanalyse implementiert und getestet. Schließlich wurden insgesamt fünf Szenarien unter verschiedenen Wetterkonditionen analysiert. In allen betrachteten Szenarien zeigt sich, dass Deutschland von einem Stromexportland zu einem Stromimporteur im Jahr 2030 werden wird. Durch den starken Ausbau erneuerbarer Energieträger können die CO₂ Emissionen signifikant reduziert werden.

1.2 Netzintegration Elektromobilität

Im Forschungsbereich Netzintegration Elektromobilität wurde der Einfluss der Elektromobilität auf das Verteilnetz im semi-urbanen Raum studiert. Dazu wurde das Verteilnetz in MATLAB/Simulink als 3-Phasensystem modelliert und anschließend verschiedene Ladestrategien miteinander verglichen. Als Referenzszenario wurde eine unkoordinierte Ladestrategie implementiert. In diesem Fall starten die Fahrzeuge direkt bei Ankunft den Ladevorgang bis die benötigte Energiemenge vollständig geladen wurde. Weitere koordinierte Ladestrategien beinhalteten die Minimierung der Kosten, die Minimierung der CO₂ Emissionen oder auch die Maximierung der Netzdienlichkeit. Es zeigt sich, dass auf diese Weise sowohl die Kosten als auch die Auswirkungen auf das Netz gegenüber unkoordiniertem Laden deutlich reduziert werden können [1],[2]. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Kosten und der Treibhausgasemissionen für die vier Szenarien für eine Winterwoche im Jahr 2050 gegenübergestellt. Im Bereich der Ladeoptimierung von Elektrofahrzeugen konnte auch eine Kollaboration mit der UC Berkeley gestartet werden, wo datengetriebene Ladestrategien und deren Auswirkungen auf elektrische Netze bzw. Energiesysteme im Allgemeinen studiert werden.

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

Tabelle 1 Energiekosten und Treibhausgasemissionen für verschiedene Szenarien für eine Winterwoche im Jahr 2050

	Kosten in €	THG-Emissionen in kg CO ₂ eq
Referenzfall	125,99	924,54
Kostenoptimiert	60,05	548,89
THG optimiert	76,39	517,50
Laden bei niedriger Nachfrage	89,05	890,85

In einem weiteren Projekt wurde eine Klassifikation verschiedener Modellierungsansätze für die Standort- und Ausbauplanung von Ladesäulen durchgeführt. Hierbei wurden wichtige Merkmale identifiziert und die bestehenden Ansätze nach den benötigten Eingabeparametern, den geographischen Gegebenheiten sowie der zeitlichen Granularität eingeordnet. Als Ergebnis kann angeführt werden, dass bereits sehr viele Ansätze für die optimale Standortwahl existieren, jedoch gibt es kaum Modelle, welche auch die zeitliche Komponente und den zu erwartenden exponentiellen Anstieg von Elektrofahrzeugen adäquat berücksichtigen.



Abbildung 1: Modell Ladesäulenmanagement

1.3 Steuerung intelligenter Energiesysteme

Im Bereich der Steuerung intelligenter Energiesysteme mittels Verfahren des Maschinellen Lernens konnten ebenfalls gute Fortschritte erzielt werden. Das bereits bestehende Framework wurde zu einem Multi-Agenten System weiterentwickelt, so dass mehrere Haushalte die über ein PV-Batteriesystem verfügen untereinander Energie austauschen können. Die hierfür entwickelten Steuerungsstrategien basieren auf Reinforcement Learning [3]. 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) 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.

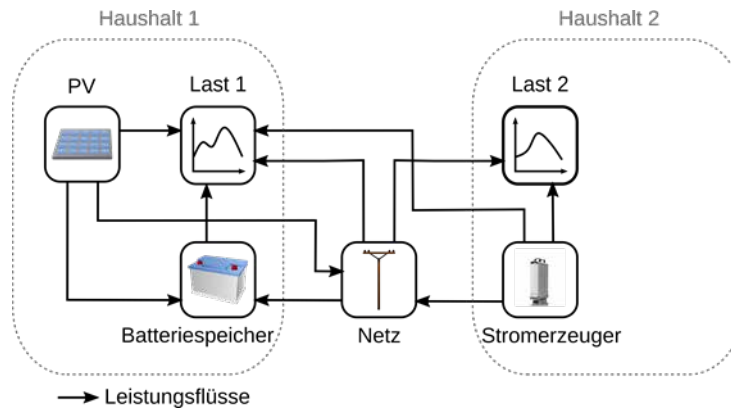


Abbildung 2: Systemkonfiguration mit zwei Haushalten und unterschiedlichen Komponenten zur Stromerzeugung und -speicherung

2 Veröffentlichungen 2019

- [1] M. Spitzer, J. Schlund, E. Apostolaki-Iosifidou, M. Pruckner: Optimized Integration of Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Grids, *Energies* 12 (2019)
- [2] J. Schlund, M. Pruckner, R. German: Flexibles Laden Wie Elektrofahrzeuge Treiber der Energiewende werden können, *IM+io Best & Next Practices aus Digitalisierung | Management | Wissenschaft*, Saarbrücken, 2019
- [3] 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.

FORSCHUNGSBEREICH

Energiemarktdesign



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Veronika Grimm

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

E-Mail
veronika.grimm@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 224

Web
www.encn.de/markt

ENERGIEMARKTDESIGN

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

Projektbericht 2019

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

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

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

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

Im Rahmen des Projekts Energiemarktdesign im EnCN² wurden zu diesen Forschungsfragen im Jahr 2019 über 30 wissenschaftliche Arbeiten in hochrangigen internationalen Zeitschriften publiziert oder als Preprint fertiggestellt. Es konnten auch dieses Jahr kompetitive Fördergelder, etwa von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) oder auch im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), eingeworben werden. Prof. Dr. Veronika Grimm wurde im Jahr 2019 in renommierte Beratungsgremien beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie beim BMWi berufen. Im Jahr 2020 erfolgte die Berufung von Prof. Dr. Veronika Grimm in den fünfköpfigen Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, dem bedeutendsten wirtschaftspolitischen Beratungsgremium in Deutschland. Prof. Dr. Alexander Martin wurde in die Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) bestellt. Die umfangreichen Aktivitäten zum Thema Wasserstoffwirtschaft und Sektorenkopplung zwischen den EnCN-Forschungsbereichen Energiemarktdesign und Speicher führten im September 2019 zur Gründung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). Das Zentrum ist am EnCN angesiedelt und entwickelt unter der Leitung von Prof. Dr. Veronika Grimm und Prof. Dr. Peter Wasserscheid zusammen mit einem Bündnis führender bayerischer Industrieunternehmen, mittelständischen Unternehmen und Verbänden („Wasserstoffbündnis Bayern“) die Grundlage für eine Wasserstoffstrategie der Bayerischen Staatsregierung. Damit erhalten auch die Kontakte der Wissenschaftler zur bayerischen Wirtschaft eine neue Qualität in einem hochdynamischen Themenfeld.

Schon seit 2013 bietet das internationale Doktorandenkolleg „Evidence Based Economics“ (gemeinsam mit der LMU München und der Universität Regensburg, Koordination in Nürnberg: Prof. Dr. Veronika Grimm) eine strukturierte Doktorandenausbildung. Außerdem wurden mehrere Nachwuchswissenschaftler/innen für ihre exzellenten Forschungsarbeiten ausgezeichnet. Im Rahmen des Schöller-Fellowships von Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh) zum Thema „Regulatorische Unsicherheit in Strommärkten“ konnte die internationale Forschungskooperation ausgebaut werden. Außerdem konnten mit dem 2019 ins Leben gerufenen Fellowship-Programm am EnCN weitere Kooperationspartner enger an den Forschungsbereich EMD gebunden werden. In diesem Rahmen kann auch in Zukunft eine enge Kooperation mit den ehemaligen EnCN-EMD-Mitgliedern Prof. Dr. Martin Schmidt (Uni Trier) und PD Dr. Lars Schewe (University of Edinburgh) erhalten werden und neue Kooperationen, wie mit Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh) und Prof. Dr. Miguel Anjos (University of Edinburgh/Polytechnique Montréal) aufgebaut werden. Prof. Dr. Miguel Anjos hat Anfang 2020 ein Schöller Senior Fellowship erhalten. Die öffentliche Wahrnehmung und wissenschaftliche Vernetzung des EnCN profitierte auch in 2019 wesentlich von der aktiven Teilnahme an internationalen Konferenzen mit über 50 Vorträgen sowie von der Durchführung von internationalen und nationalen Workshops und Seminaren in Nürnberg. Hervorzuheben ist hierbei die bereits fünfte Auflage des 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 der Langen Nacht der Wissenschaften in der Metropolregion Nürnberg. Auch die Lehre an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg profitiert weiterhin in hohem Maße von den Aktivitäten am EnCN. Ein breites Spektrum mathematischer und ökonomischer Vorlesungen, die Betreuung von etwa 30 Abschlussarbeiten für Bachelor- und Masterstudierende und ein Seminar in Kooperation mit der N-ERGIE AG boten den Studierenden verschiedener Studienrichtungen 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.



Abbildung 1: Das Team Energiemarktdesign am Energie Campus Nürnberg.

1 Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten

1.1 Modellierung von Strommärkten

Im ersten Teilprojekt „Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten“ arbeiten Mathematiker und Volkswirte an der mehrstufigen Modellierung von Strommärkten sowie an der Entwicklung von mathematischen Verfahren für deren Lösung. Im Fokus stehen die Entscheidungen der verschiedenen Akteure im liberalisierten Strommarkt, die in mehrstufigen Gleichgewichtsmodellen analysiert werden (Abbildung 2). Dabei wird untersucht, inwieweit sich alternative Rahmenbedingungen, die im Kontext der Energiewende diskutiert werden, auf Investitionen auswirken können und wie nahe das Ergebnis am Systemoptimum liegt. Die interdisziplinäre Kooperation in der Modellentwicklung hat bereits in der ersten Förderphase des EnCN wesentlich zur Entwicklung eines mehrstufigen Strommarktmodells (Grimm et al., 2016) beigetragen und wurde seitdem mit mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu theoretischen und angewandten Forschungsfragen erfolgreich fortgesetzt. Durch Masterarbeiten, z. B. zu den Themen flexible Verbraucher und Sektorenkopplung, konnten Studierende der FAU Erlangen-Nürnberg in die Forschung am EnCN mit eingebunden werden. Auch werden aktuell neue Modellansätze zur Kopplung von Strommärkten mit Gasmärkten, Wasserstoffmärkten und mit batterieelektrischer Mobilität entwickelt. Daraus ergeben sich eine Reihe interessanter Forschungsfragen an der Schnittstelle zum EMD-Teilprojekt „Ökonomische Analyse von Gasmärkten“. Außerdem wurde die Kooperation mit den Ingenieurwissenschaften aus dem Projekt Speicher B am EnCN im Bereich der Kopplung von Stromwirtschaft und Wasserstoffmobilität erfolgreich fortgeführt (Runge et al., 2019). Ende 2019 ist außerdem das Verbundprojekt EOM-Plus im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des BMWi gestartet. In diesem Rahmen untersucht ein Team um Prof. Dr. Veronika Grimm und Dr. Jonas Egerer, mit Kollegen der TH Ingolstadt und der Stiftung Umweltenergierecht (Würzburg), in den kommenden drei Jahren kurz- und mittelfristige Auswirkungen von marktbasieren Engpassinstrumenten als regionale und temporäre Ergänzung zum bestehenden Energy-Only-Strommarktdesign. Im Kontext der Diskussion zur CO₂-Abgabe als Teil des Klimaschutzpakets der Bundesregierung wurden im Projekt EMD aus juristischer Sicht Möglichkeiten sozialverträglicher CO₂-Preise untersucht (Ismer et al., 2019a; Ismer et al., 2019b).

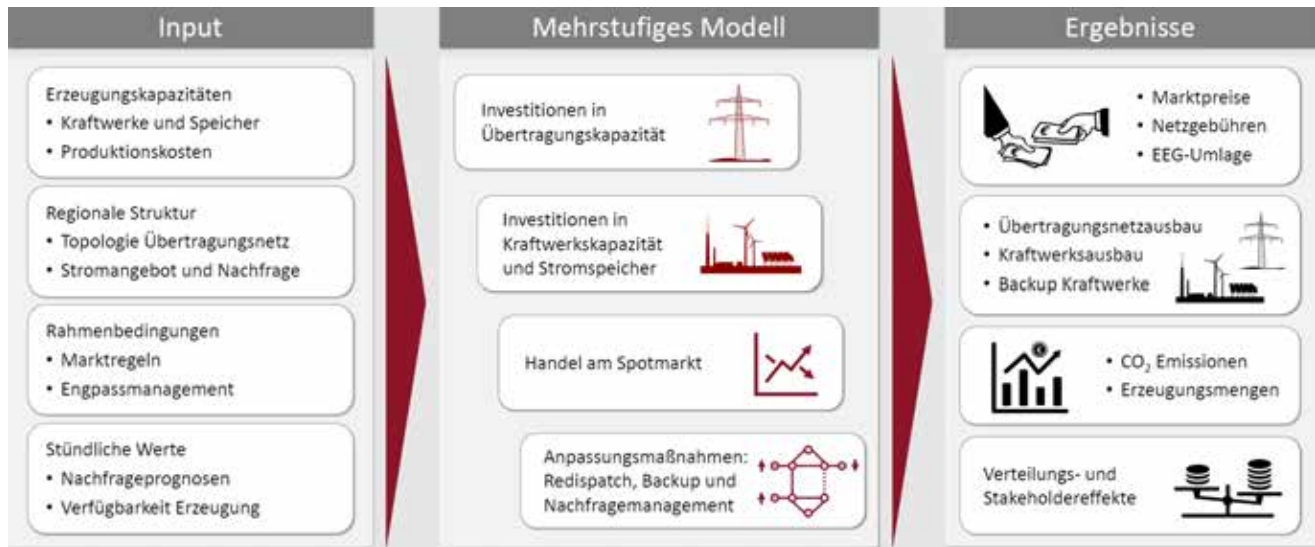


Abbildung 2: Mehrstufige Modellierung von Strommärkten am Energie Campus Nürnberg. Eigene Darstellung.

1.2 Anwendungen und Weiterentwicklung der Methoden

Im Jahr 2019 wurden verschiedene aktuelle Fragen der energiepolitischen Diskussion in Deutschland detailliert beleuchtet. Für die Betrachtung des deutschen Strommarktes wurde das „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Modell (Grimm et al., 2016; Grimm et al., 2018) für Deutschland angepasst und mit geeigneten Daten kalibriert. Hierzu wurde von Ambrosius et al. (2019) ein umfassender Datensatz anhand des Szenariorahmens des Netzentwicklungsplans und weiterer Quellen erarbeitet und veröffentlicht. In verschiedenen Beiträgen konnte gezeigt werden, dass Anpassungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen, z. B. die Einführung einer zweiten deutschen Preiszone (Grimm et al., 2019b; Ambrosius et al., 2020c) oder die Abregelung von Erneuerbaren Energien durch Einspeisemanagement (Grimm et al., 2018), zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und Einsparungen beim Netzausbau führen können. Grimm et al. (2019c) untersuchen mit Hilfe des GATE Modells die Einführung einer regional differenzierten Netzentgeltkomponente (G-Komponente) zur Generierung regionaler Investitionsanreize und zeigen, dass diese zwar in der Lage ist lokale Investitionsanreize für neue Erzeugungsanlagen zu setzen, kurzfristig aber nicht zu differenzierten Preissignalen am Strommarkt führt. Daher können im Gegensatz z. B. zu einem Nodalpreissystem keine signifikanten Auswirkungen auf die Wohlfahrt oder den Netzausbau festgestellt werden. In einem Folgeprojekt wird derzeit die Fragestellung analysiert, welchen Einfluss Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen auf den optimalen Ausbau konventioneller und erneuerbarer Energien haben. Die dabei betrachteten Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emission sind ein gesetzlich festgelegter Kohleausstieg bis 2035 und die Erhöhung der CO₂-Bepreisung im Stromsektor, z. B. mittels Einführung eines nationalen Mindestpreises für den Europäische Emissionshandel (Abbildung 3).

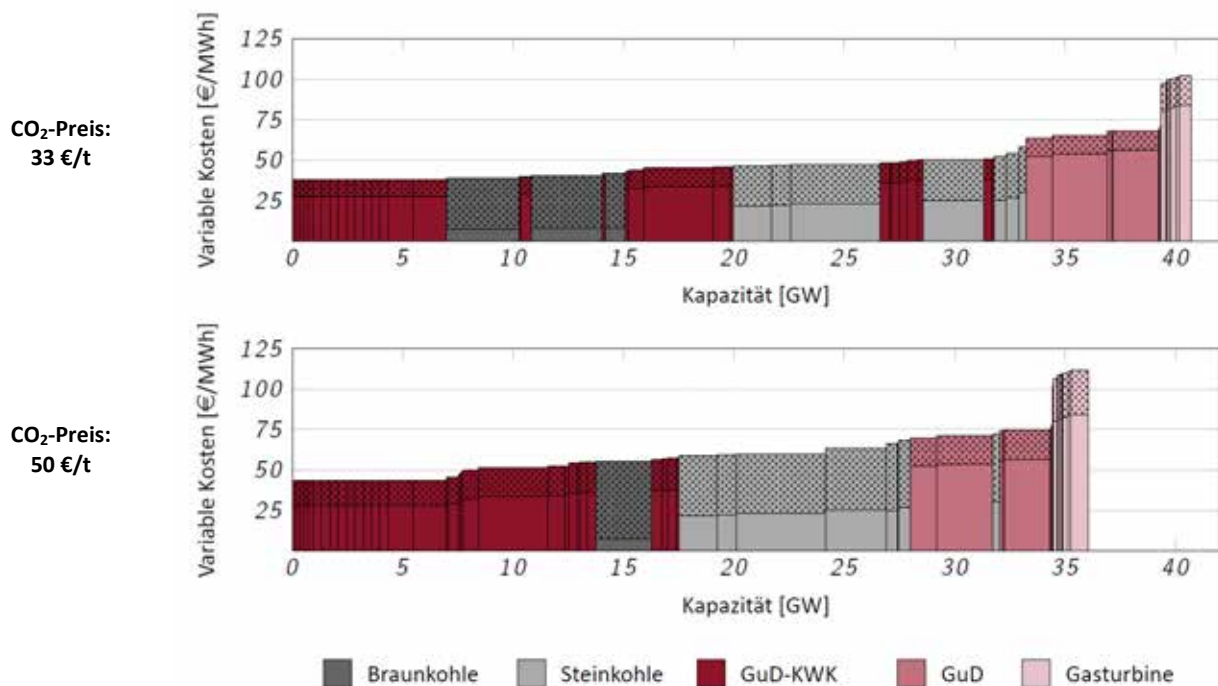


Abbildung 3: Merit-Order konventioneller Kraftwerke in Deutschland im Jahr 2035 für unterschiedliche CO₂-Preise (mit Kosten für Brennstoff sowie CO₂-Emissionen in schraffierter Fläche). Eigene Darstellung.

Für den Atom- und Kohleausstieg bedarf es eines ambitionierten Ausbaupfads der erneuerbaren Stromerzeugung. Dabei wird die regionale Verteilung neuer Investitionen eine zentrale Rolle für die zukünftigen Kosten des Stromsystems haben. In Kooperation mit Prof. Dr. Martin Bichler (Technische Universität München, TUM) wird deshalb untersucht, wie verschiedene Auktionsformate die Höhe der Einspeisevergütung und die regionale Verteilung von neuen Investitionen in erneuerbare Erzeugungsanlagen beeinflussen (Bichler et al., 2019). Basierend auf Felddaten und mithilfe numerischer Simulationen wird für verschiedene Auktionsregimes das Ergebnis sowohl nationaler als auch regionaler Windausschreibungen in Deutschland berechnet, wobei unterschiedlich starke Synergien berücksichtigt werden. Es kann 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 4). Auf Basis dieser Erkenntnisse können wertvolle Vorschläge zur Verbesserung des deutschen Auktionsregimes erarbeitet werden.

Ein weiteres Forschungsthema im Teilprojekt ist die Betrachtung der Auswirkung von regulatorischer Unsicherheit und von Risikoaversion der Akteure in Kooperation mit Dr. Harry van der Weijde (University of Edinburgh). Ambrosius et al. (2020a) untersuchen regulatorische Unsicherheit im Strommarkt, in Bezug auf zukünftige Änderungen von Marktbedingungen und Marktregeln. Regulatorische Unsicherheit wird in der energiepolitischen Debatte oft als Hemmnis von Investitionen in Erzeugungs- und Übertragungskapazitäten angeführt. Dies kann in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung am Beispiel einer möglichen Einführung von Preiszonen als Quelle der Unsicherheit detailliert analysiert werden. Es zeigt sich, dass bereits eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Einführung von Preiszonen zu veränderten Investitionsentscheidungen führt. Unsicherheit hat dabei Einfluss auf den Netzausbau, die regionale Verteilung von Investitionen in Erzeugungskapazität sowie auf den Technologiemark. Die Erwartung eines effektiveren Marktdesigns kann dabei durchaus zu Effizienzsteigerungen führen, selbst wenn sich diese Erwartungen nicht realisieren. In einem Folgeprojekt wird aktuell die Rolle von Risikoaversion für die Entscheidung über Investitionen unter Unsicherheit untersucht (Ambrosius et al. (2020b)).

Im Rahmen eines interdisziplinären Projektvorhabens zwischen Forschenden der Ingenieurwissenschaften (Speicher B) und Wirtschaftswissenschaften (Energiemarktdesign) werden synthetische Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als nachhaltige Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft untersucht. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Auswirkungen

verschiedener Strommarktdesigns auf die Produktionskosten der Kraftstoffe. Runge et al. (2019) zeigen, dass die Ausgestaltung der Marktregeln sowohl einen erheblichen Einfluss auf die Produktionskosten als auch auf die optimale Ausgestaltung des Produktionsprozesses haben kann. Aktuell wird im Rahmen der Kooperation das globale Potential nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe untersucht, da diese Kraftstoffe CO₂-neutrale Alternativen zu konventionellen Erdölprodukten darstellen. Bei der Produktion von synthetischen Kraftstoffen machen Stromkosten einen wesentlichen Teil der Herstellungskosten aus. Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien sind in den letzten Jahren stark gesunken, variieren global aber sehr stark. Es werden mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, die sich durch die gute Verfügbarkeit und ihr großes Potential erneuerbarer Stromerzeugung auszeichnen und aus denen in Zukunft Wasserstoff nach Deutschland und Europa importiert werden könnte.



Abbildung 4: Regionale Verteilung neuer Windkraftanlagen in Deutschland mit einer Leistung von insgesamt 2600 MW für verschiedene Ausschreibungsregimes. Vgl. Bichler et al. (2019).

Bei der Weiterentwicklung von Lösungsansätzen und der Analyse des Strommarktmodells wurden in der zweiten Förderphase des EnCN erhebliche Fortschritte erzielt. Krebs, Schewe und Schmidt (2018), Krebs und Schmidt (2018), Krebs und Schmid (2019) und Krebs, Müller und Schmid (2019) bewiesen grundlegende Aussagen zur Eindeutigkeit von Gleichgewichten in Strommärkten. Diese Arbeiten konnten durch die Betrachtung von Speichern (Grübel et al., 2019) und die Weiterentwicklung von Lösungsverfahren für mehrstufige Energiemarktmodelle (Egerer et al., 2020; Kleinert und Schmidt, 2019a; Kleinert und Schmidt, 2019b; Kleinert et al., 2019) fortgeführt werden.

Dabei zeigen Grübel et al. (2019), 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. Klassische Lösungsverfahren für mehrstufige Optimierungsprobleme verwenden oft eine so genannte BigM-Linearisierung. In Kleinert et al., 2019 wird gezeigt, dass darauf basierende Verfahren in der Praxis oft nicht verwendet werden können. In Kleinert und Schmidt, 2019b wird deshalb eine Heuristik für zweistufige Optimierungsprobleme vorgestellt, die ohne eine solche Linearisierung auskommt. Außerdem wird in Kleinert und Schmidt (2019a) ein globales Lösungsverfahren für mehrstufige Energiemarktmodelle, die insbesondere auch Netzausbau beinhalten, vorgestellt. Egerer et al. (2019) eröffnen durch eine Abbildung von Nachbarmärkten in mehrstufigen Marktmodellen die Grundlage, regionale Ausbauentscheidungen in einem integrierten Strommarkt zu untersuchen. Dabei kann die Kernregion über Technologiemix und regionale Verteilung der erneuerbaren Stromerzeugung sowie den Stromnetzausbau entscheiden, wobei mit der Kernregion verbundene Stromsysteme hinsichtlich Interaktionen über den Spotmarkt und marktgetriebene Kraftwerksinvestitionen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Berücksichtigung des Gesamtsystems die regionale Planung verbessern, aber auch einzelne Investitionsentscheidungen beeinflussen kann. Der Modellansatz ist von großer Bedeutung für die Untersuchung zentraler Fragen der deutschen Energiewende im europäischen Kontext.

Im kommenden Jahr werden die aktuell laufenden Aktivitäten fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung der Methoden im Hinblick auf dezentrale Strommärkte (Projekt EOM-Plus) sowie deren Kopplung mit Gasmärkten, Wasserstoffmärkten und innovativen Mobilitätskonzepten (Abbildung 5). In diesem Rahmen soll die Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B weiter ausgebaut werden. Eine Weiterentwicklung der Strommarktmodellierung ist mit einer Abbildung des Flow-Based Market Couplings angedacht (Lang, Dallinger und Lettner, 2020). 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 Datenanalysemethoden zum deutschen Strommarkt weitergeführt.

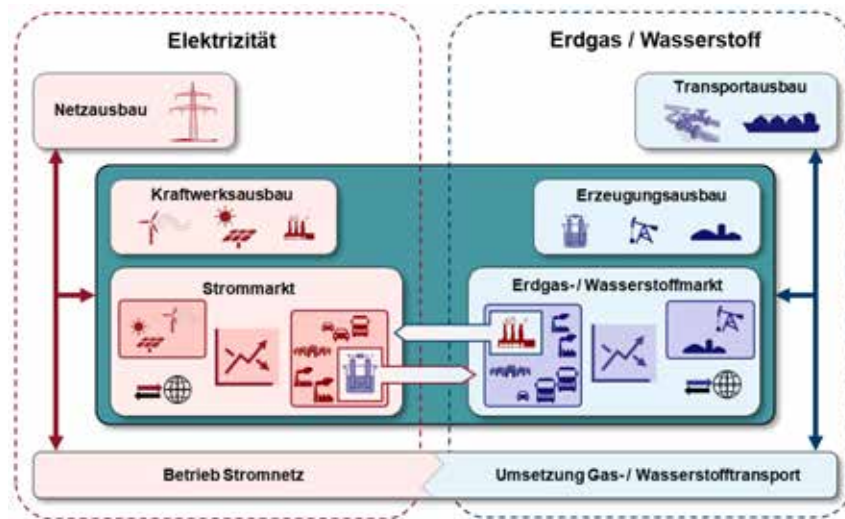


Abbildung 5: Kopplung der Energiemärkte für die Sektoren Strom und Erdgas / Wasserstoff. Eigene Darstellung.

1.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Mirjam Ambrosius, Christian Biefel, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Dr. Manuel Haußner, Prof. Dr. Roland Ismer, Thomas Kleinert, Vanessa Krebs, Sandra Kretschmer, Lukas Lang, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Galina Orlinskaya, 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 (Universität Edinburgh), Prof. Dr. Martin Schmidt (Universität Trier), Dr. Harry van der Weijde (Universität Edinburgh)

2 Ökonomische Analyse von Gasmärkten

2.1 Modellierung von Gasmärkten

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

Mit der mathematischen Beschreibung eines mehrstufigen Gasmarktproblems (Grimm et al., 2019d) wurde in der Zeit vor dem Berichtsjahr 2019 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 6 dargestellt, ist dabei zwischen der physikalischen Systembetrachtung der Gasnetzbetreiber (links) und der Interaktion auf dem Gasmarkt (rechts) zu unterscheiden. Gasnetzbetreiber bestimmen über die technischen Kapazitäten und die Buchungspreise (Stufe 1) sowie den kostenoptimalen Betrieb des Gastransports (Stufe 4), während die Marktakteure durch Buchungen von Kapazitäten (Stufe 2) und Nominierungen (Stufe 3) am Gasmarkt handeln. Die Arbeiten in diesem Forschungsschwerpunkt betrachten aufbauend auf dieser Grundlage realitätsnahe Kalibrierungen für das deutsche System und liefern damit Abschätzungen für die konkreten Ineffizienzen des Entry-Exit Systems. 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., 2020; Labbé et al., 2019; Schewe, Schmidt und Thürauf, 2019). Zusätzlich kann für die Modellierung von Entry-Exit Gasmärkten im Forschungsschwerpunkt vielfach auf die grundlegenden Ergebnisse des SFB TRR 154 zurückgegriffen werden (Aßmann, Liers und Stingl, 2018; Burlacu et al., 2019; Geißler et al., 2018; Grimm et al., 2019a; Hiller et al., 2018; Kufner et al., 2019; Kleinert, Grimm und Schmidt, 2019; Liers et al., 2020; Liers, Schewe und Thürauf, 2019).

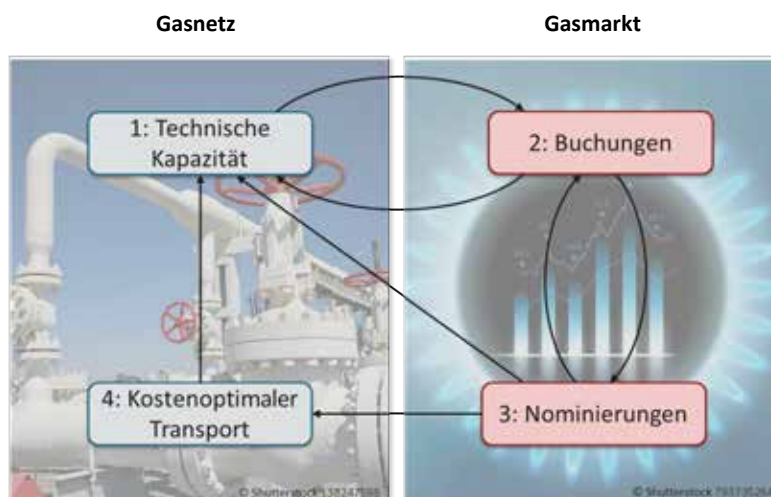


Abbildung 6: Abhängigkeiten in dem mehrstufigen Modell des Europäischen Entry-Exit Systems. Vgl. Grimm et al. (2019d).

2.2 Anwendungen

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

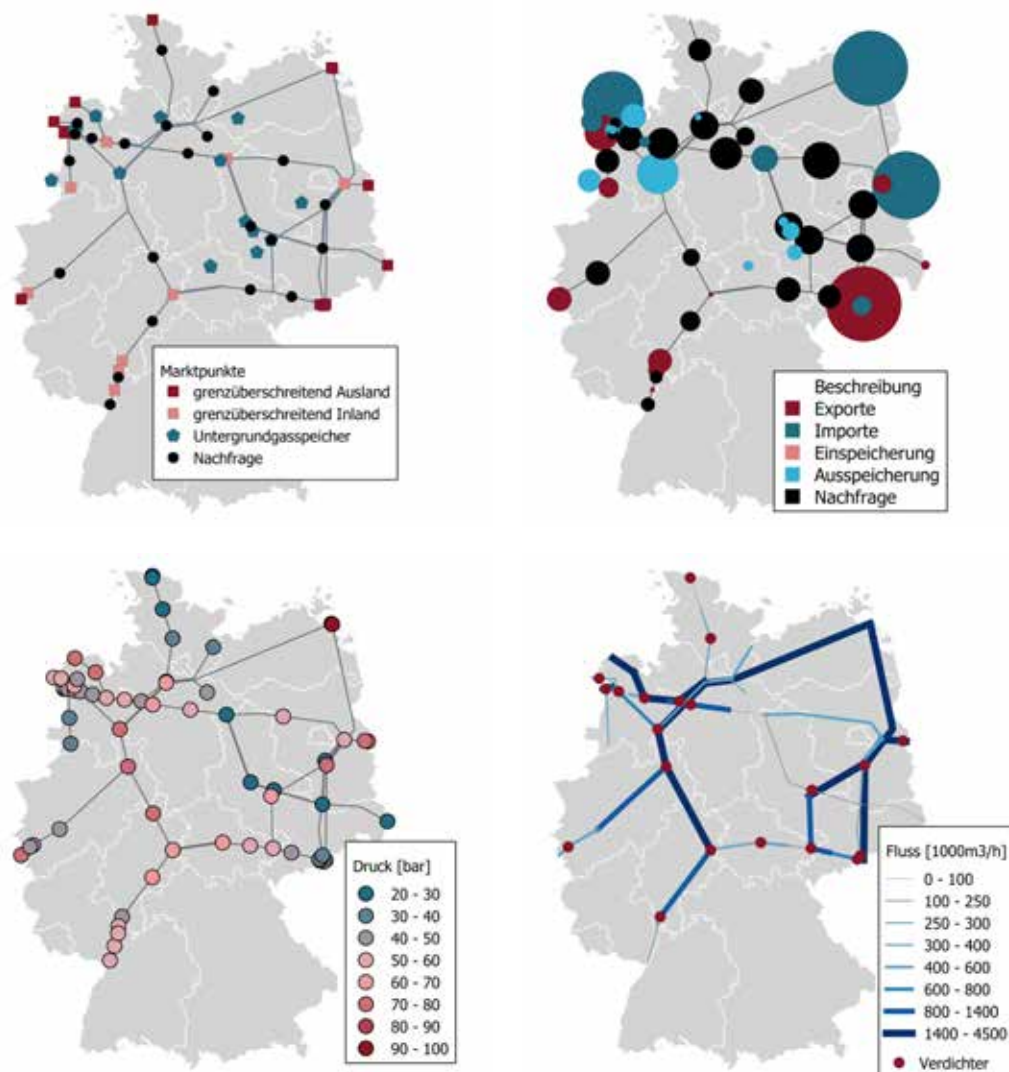


Abbildung 7: Darstellung der GASPOOL Markregion mit wichtigen Pipelines sowie Markt- und Nachfragepunkten (links oben), Ein- und Ausspeisung an einem Wintertag (rechts oben) und Modellergebnisse mit Druckniveaus an Netzknoten (links unten) und Gasflüssen mit Verdichterstationen (rechts unten). Eigene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

Außerdem werden Verfahren für optimale Ausbauentscheidungen in potentialgetriebenen Transportnetzen, zu denen auch Gastransportnetzwerke zählen, am EnCN entwickelt (Robinius et al., 2019). Eine weitere auf den entwickelten Verfahren basierende Publikation, in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich, berechnet mit einem stärkeren Anwendungsfokus mögliche Wasserstoffnetze in Deutschland (Reuß et al., 2019). Wasserstoff als Energieträger könnte in Deutschland in Zukunft teils aus überschüssigen erneuerbaren 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) berechnen in diesem Kontext für verschiedene Szenarien und Annahmen die optimale Topologie für mögliche Wasserstoffpipelines (Abbildung 8). Dabei wird 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 kann damit gezeigt werden, dass durch eine entsprechende Auslegung der Netzinfrastruktur, insbesondere in Baumnetzen, die Investitionskosten zusätzlich gesenkt werden können.

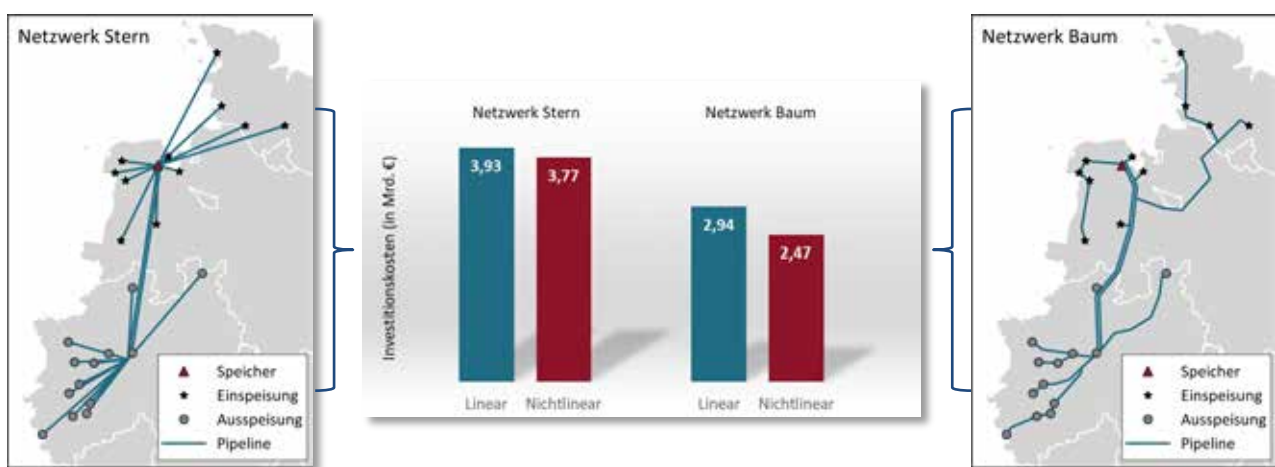


Abbildung 8: Netzwerktopologie für stern- und baumförmige Investitionen in Wasserstoffpipelines. Vgl. Reuß et al. (2019).

Eine weitere zentrale Herausforderung für die Energiewende ist die Substitution von fossilen Erdöl und Erdgas im Energiesystem. Um dieses Ziel erreichen zu können, wird Sektorenkopplung im Energiesystem eine entscheidende Rolle spielen. An der Schnittstelle zwischen den Forschungsschwerpunkten „Investitionsanreize in liberalisierten Strommärkten“ und „Ökonomische Analyse von Gasmärkten“ wird daher aktuell an neuen Marktmodellen gearbeitet, die eine Abbildung von mehreren Energiemärkten in mehrstufigen Optimierungsproblemen erlauben. Dabei ist insbesondere eine detaillierte Abbildung der Schnittstellen zwischen verschiedenen Energiemärkten eine zentrale Herausforderung. Hierzu wurden in 2019 durch die Betreuung von Masterarbeiten und die Erarbeitung von Modellansätzen die Grundlagen für weitere Forschungsarbeiten gelegt. Mit der Modellierung von Sektorenkopplung kann zukünftig eine Vielzahl für die Energiewende relevanter Forschungsfragen adressiert werden, z. B. die Rolle von sektorenspezifischen Steuern und Abgaben, von Power-to-Gas Technologien zur Speicherung überschüssiger erneuerbarer Stromerzeugung und von sektorenübergreifender Planung von Investitionen in Netzinfrastruktur. Außerdem werden im Rahmen dieser Projekte detaillierte regionale Datensätze des deutschen Energiesystems erstellt.

2.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler: Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Julia Grübel, Thomas Kleinert, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Johannes Thürauf, Prof. Dr. Gregor Zöttl

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

3 Geschäftsmodelle in Smart Grids

3.1 Allgemeine Problemstellung

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

Die Forschungsarbeiten bauen auf Vorarbeiten aus der ersten Förderphase des EnCN auf. Durch die Beteiligung an dem Projekt „Smart Grid Solar“ wurde der Grundstein für eine Modellierung des Zusammenspiels der Akteure im Verteilnetz gelegt. Außerdem wurde in einer umfangreichen Feldstudie im Rahmen des Förderprojekts „SWARM“ das Investitionsverhalten von Haushalten bei vernetzten Stromspeichern untersucht (Grimm, Kretschmer und Mehl, 2018) sowie die Rolle von Pilotprojekten (Grimm, Kretschmer und Mehl, 2019). Haußner und Ismer (2018) betrachten die rechtlichen Rahmenbedingungen des Speicherbetriebs mit Blick auf die Entflechtung auf Verteilnetzebene (Abbildung 9). In laufenden Arbeiten mit stärkerem mathematischem Fokus werden diese verschiedenen Perspektiven ergänzt, indem Grimm et al. (2019e) optimale Tarifstrukturen auf der Endverbraucherebene in Smart Grids mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme bestimmen und Grimm et al. (2020) das Zusammenwirken von Speicher- und Leitungsinvestitionen in Verteilnetzen in Hinblick auf den Regulierungsrahmen in einem zweistufigen Gleichgewichtsmodell untersuchen. Bohlayer und Zöttl (2018) und Bohlayer und Zöttl (2020) betrachten die Auslegung und den Betrieb des Energieversorgungssystems und der Flexibilisierungsoptionen eines mittelständischen Unternehmens unter exakter Berücksichtigung der Temperaturniveaus von Wärme- und Kältebedarfen der analysierten industriellen Prozesse.

3.2 Anwendungen

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). 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) untersuchen mit diesem Ansatz mögliche Anpassungen der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen, u.a. die Abregelung von erneuerbaren Energien, die Einführung eines Netzentgelts, das sich an der maximalen Einspeisung der erneuerbaren Energien orientiert sowie ein Subventionsprogramm für Speicherinvestitionen. Die Leistung der verschiedenen alternativen Rahmenbedingungen wird mit der Leistung nach den heute in verschiedenen Ländern üblichen Regeln sowie mit einem systemoptimalen Benchmark verglichen. Zur Veranschaulichung der wirtschaftlichen Auswirkungen ist das Modell mit Daten aus dem Feldprojekt „Smart Grid Solar“ kalibriert. Die Ergebnisse in Grimm et al. (2020) zeigen, dass sowohl eine Abregelung erneuerbarer Produktion als auch eine Neugestaltung der Netzentgelte das Potenzial haben, die Gesamtsystemkosten deutlich zu reduzieren. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine reine Förderung von Speicherinvestition dagegen nur eine begrenzte Wirkung hat, solange der Verteilnetzbetreiber nicht in den Speicherbetrieb eingreifen darf.

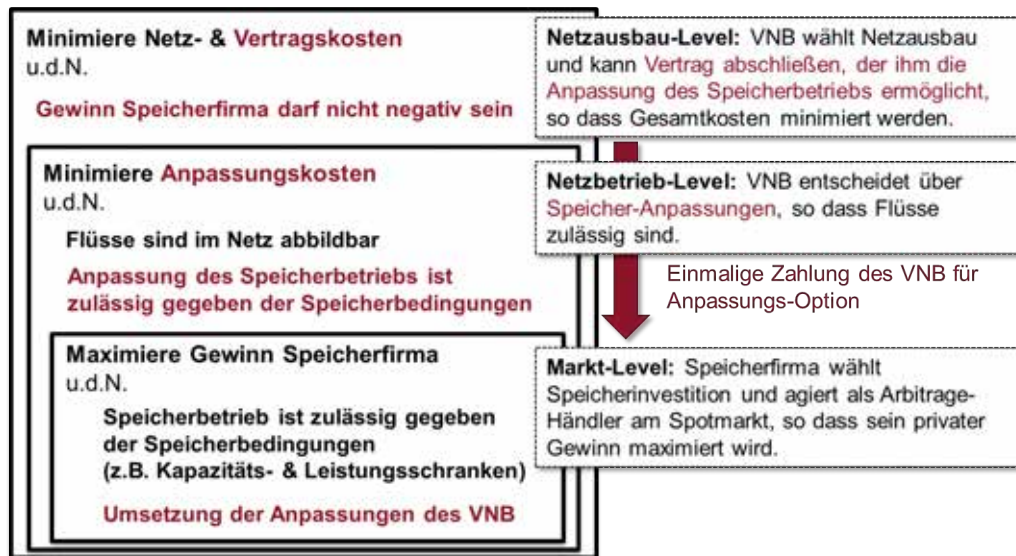


Abbildung 9: Schematische Darstellung des dreistufigen Optimierungsproblems zur Abbildung der Mehrfachnutzung von Speichern. Eigene Darstellung.

Im Rahmen des Projekts SWARM (Akzeptanz und Adaption in der Energiewende am Beispiel vernetzter Stromspeicher) wurde am EnCN die Investitionsbereitschaft privater Haushalte in Kleinspeicheranlagen untersucht. Auf Basis umfangreicher Umfragedaten und unter Verwendung korrelationsbasierter Clusteralgorithmen konnten dabei von Grimm, Kretschmer und Mehl (2018) vier Kundentypen mit unterschiedlichen Anspruchshaltungen identifiziert werden: finanziell, sicherheits-, idealistisch und multilateral orientierte Speicherkunden. Die Ergebnisse verschiedener Random-Forest-Analysen deuten zudem darauf hin, dass Investitionsbereitschaft und -treiber in den vier Gruppen divergieren und zielgruppenspezifische Fördermaßnahmen die vermehrte Nutzung von Kleinspeicheranlagen unterstützen können (Abbildung 10). Zusätzlich untersuchen Grimm, Kretschmer und Mehl (2019) in einer weiteren Studie, 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. Es zeigt sich, dass eine Kooperation staatlicher, privatwirtschaftlicher und wissenschaftlicher Akteure im Rahmen von Pilotprojekten einen positiven Einfluss auf die Wahrnehmung getesteter Produkte hat. Hinsichtlich der Bereitschaft zur Teilnahme an Pilotprojekten wird von potenziell Teilnehmenden insbesondere auf eine transparente Kommunikation und intensive Betreuung Wert gelegt. Diese sind sogar bedeutsamer als finanzielle Vorteile.

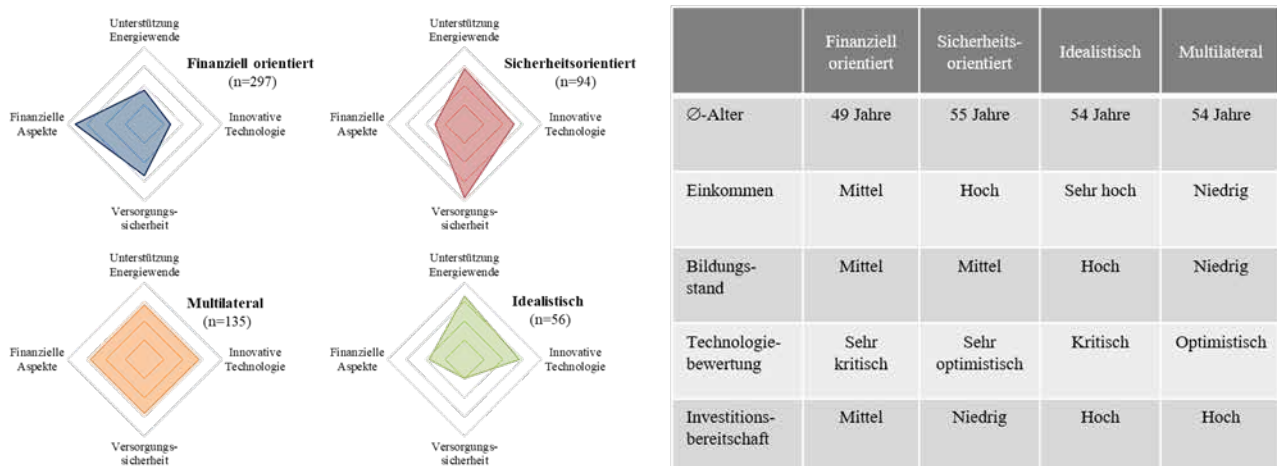


Abbildung 10: Relevanz verschiedener Kaufkriterien und Identifikation unterschiedlicher Investitionstypen. Eigene Darstellung.

Aus der Forschungsarbeit zu Stromversorgungstarifizierung auf der Endverbraucherebene ist im Jahr 2019 die Publikation Grimm et al. (2019e) 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 11), 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.

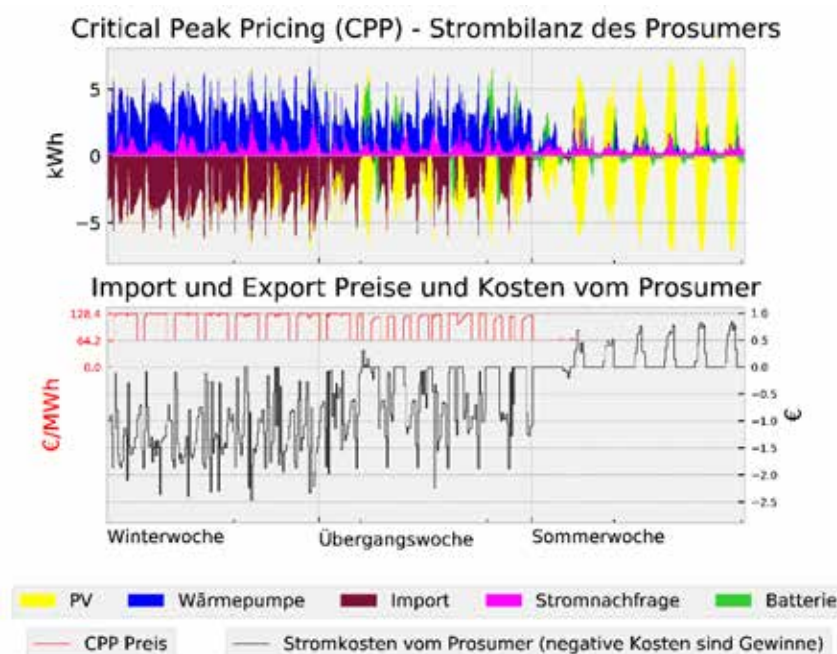


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Preise und Strombilanz für den Prosumer. Eigene Darstellung.

3.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

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

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

4 Schlussworte

Im Jahr 2019 konnte sich der Forschungsbereich Energiemarktdesign des EnCN sehr erfolgreich weiterentwickeln. Die Ergebnisse der Forschung wurden auf zahlreichen hochangesehenen Fachtagungen und auch im Rahmen der wirtschaftspolitischen Beratung in Gremien auf nationaler und EU-Ebene präsentiert, in internationalen Spitzenzeitschriften veröffentlicht und umfangreich in Wissenschaft und Politik rezipiert. Die Aktivitäten des EnCN sind prägend für den FAU-Forschungsschwerpunkt „Energiesysteme der Zukunft“, den Schwerpunkt „Modellierung, Simulation und Optimierung“ der Naturwissenschaftlichen Fakultät der FAU und den Schwerpunkt „Energiemärkte und Energiesystemanalyse“ des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der FAU. Die Vernetzung von EMD mit dem EnCN-Projekt Speicher B ist mit einer gemeinsamen hochrangigen Veröffentlichung und weiteren laufenden Projekten auf einem sehr erfolgreichen Entwicklungspfad. Forschung im Bereich der Sektorenkopplung, z. B. im Rahmen innovativer Mobilitätskonzepte bietet an der Schnittstelle ein großes Potenzial für weitere Aktivitäten. Insbesondere vor dem Hintergrund des European Green Deal und der damit einhergehenden ambitionierteren Klimaziele bekommen diese Themen in den kommenden Jahren eine noch größere praktische Relevanz. Mit Blick auf die Struktur des Projekts Energiemarktdesign führt diese Entwicklung zu einem zunehmenden Verschmelzen der drei Teilprojekte und zu einer Intensivierung der Kooperation mit ingenieurwissenschaftlichen Forschungsgruppen. Insbesondere die Aktivitäten des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) können so optimal wissenschaftlich flankiert werden. Neben einer Stärkung der gemeinsamen Aktivitäten mit Speicher B innerhalb des EnCN drückt sich der stärkere interdisziplinäre Fokus beispielsweise in dem jüngst gestarteten Verbundprojekt EOM-Plus aus, das gemeinsam mit der TH Ingolstadt (Ingenieurwissenschaften) und der Würzburger Stiftung Umweltenergierecht durchgeführt wird. In diesem Rahmen sollen auch die Möglichkeiten des BayWiss-Verbundkollegs für gemeinsame Promotionen genutzt werden.

Die Vernetzung mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern wurde im Rahmen von Workshops und anderen Austauschformaten auch im Jahr 2019 weiter vorangetrieben. Ein regelmäßiges Workshop-Format, das die energieökonomischen Gruppen der TU München, des ifo Institut München, des DIW Berlin und der TU Berlin mit den Aktivitäten an der FAU und dem EnCN vernetzt, wird unmittelbar im März 2020 fortgeführt. Im Rahmen der gemeinsamen Konferenz „The Potential of Hydrogen in a Decarbonized Energy Economy“ konnte eine Kooperation mit dem neuen Mannheim Institute for Sustainable Energy Studies (MISES) initiiert wird, die im Jahr 2020 intensiviert werden soll. Im Mai 2020 ist unter Federführung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) und in Kooperation mit der IHK Nürnberg für Mittelfranken eine zweitägige Konferenz zum Thema „Zukunft Wasserstoff“ geplant, an der die Wissenschaftler aus EMD, die zahlreichen Unternehmens-Partner des „Wasserstoffbündnis Bayern“ und auch hochrangige Vertreter der Politik teilnehmen werden. Diese Aktivitäten werden nicht zuletzt der Vernetzung und der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft einen weiteren Schub verleihen. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen der Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft auf den Arbeitsmarkt in einer Kooperation mit dem Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (IAB) näher untersucht werden. Ein erster Workshop zu diesem Themenkomplex ist im April 2020 geplant. International fand im Jahr 2019 ein Austausch mit Energieforschern aus aller Welt statt, zum Beispiel im Rahmen einer Vorstellung der EMD-Forschungsthemen auf dem Abschlussworkshop des mehrmonatigen Programms „The Mathematics of Energy Systems“ am Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences der Universität Cambridge. Außerdem wurde die Kooperation mit der University of Edinburgh intensiviert. Es konnten in dem Zusammenhang verschiedene Projekte mit Dr. Harry van der Weijde vorangetrieben werden, der seit 2018 im Rahmen eines „Schöller Junior Fellowships“ mit den FAU-Forschern des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften kooperiert. In Zukunft werden sich die Beziehungen zur University of Edinburgh durch eine Kooperation mit PD Dr. Lars Schewe (der aus Erlangen im Jahr 2019 nach Edinburgh berufen wurde) sowie durch eine Kooperation mit dem Edinburgher Mathematik-Professor Miguel Anjos ausweiten. Durch die Anbindung ehemaliger EMD-Forscher wie Prof. Dr. Martin Schmidt (in Trier seit Beginn 2019) und PD Dr. Lars Schewe sowie weiterer langjähriger Kooperationspartner als „EnCN Fellows“ und einem regelmäßigen Austausch wird ein starkes (inter-)nationales Netzwerk erhalten und ausgebaut.

Der Forschungsbereich EMD hat in den vergangenen Jahren erfolgreich Nachwuchsarbeit geleistet. Nachwuchsforschende werden systematisch in die oben aufgeführten nationalen und internationalen Kooperationen sowie in die Politikberatung eingebunden und übernehmen auch immer wieder Aktivitäten im Rahmen der „Third Mission“. In der Lehre werden seit Jahren Seminare und Abschlussarbeiten gemeinsam mit Kooperationspartnern aus der

Wirtschaft durchgeführt. Post-Doktoranden, die in die Projektaktivitäten am EnCN eingebunden waren oder sogar im Rahmen des EnCN berufen wurden, haben mittlerweile Rufe auf renommierte Lehrstühle oder auf permanente Positionen an anderen Universitäten erhalten. Zahlreiche Doktorandinnen und Doktoranden haben nach ihrer Promotion eine Tätigkeit in der Privatwirtschaft angetreten. Im Rahmen des 1000-Professoren-Programms von Bund und Ländern werden aktuell weitere 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 sind zwei weitere Berufungsverfahren laufend: Am Fachbereich Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der FAU wird eine W1-Tenure-Track-Professur im Themenfeld „Future Energy Systems“ besetzt. Das Department Mathematik schreibt eine W1-Professur im Themenfeld „Optimierung von Energiesystemen“ aus.

5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

Prof. Dr. Veronika Grimm war im Jahr 2019 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied im Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (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)
- 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)
- Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung des Energie Campus Nürnberg (seit 2017)
- Sprecherin des FAU-Forschungsschwerpunkts „Energiesysteme der Zukunft“, mit D. Guldi (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 „Energienmärkte und Energiesystemanalyse“ des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (seit 2015)
- Mitglied des Kuratoriums des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (seit 2015)
- Mitglied des Erweiterten Vorstands des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2015)
- Mitglied des Steering Boards, Campus Future Energy Systems (seit 2015)
- Mit-Herausgeberin von Perspektiven der Wirtschaftspolitik (PWP) (seit 2015)
- Mitglied der Expertenkommission „Stärkung von Investitionen in Deutschland“ des BMWi (seit 2014)
- Mitglied des Sozialwissenschaftlichen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2011)
- Mitglied des Industrieökonomischen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2010)

Prof. Dr. Roland Ismer war im Jahr 2019 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

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

Prof. Dr. Frauke Liers war im Jahr 2019 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Koordinatorin des Marie-Curie ITN MINOA (Mixed Integer Nonlinear Optimization: Algorithms and Applications) (seit 2018)
- Mit-Herausgeberin von Discrete Optimization (seit 2018)
- Mitglied des Vorstandes des SFB/TRR 154 „Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzen“ (seit 2017)
- Mit-Herausgeberin von „Optimization and Engineering“ (seit 2016)
- Studiendekanin, Department Mathematik, FAU (von 2016 bis 2019)
- Mit-Herausgeberin von „Mathematical Methods of Operations Research“ (seit 2015)

Prof. Dr. Alexander Martin war im Jahr 2019 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) (seit 2019)
- Mitglied im Senats- und Bewilligungsausschuss für Graduiertenkollegs der DFG (seit 2019)
- Mitglied des Vorstands der Gesellschaft für Operations Research (GOR) (seit 2019)
- Mitglied des Meeting Committee der European Mathematical Society (seit 2017)
- Mit-Herausgeber von Journal of Optimization Theory and Applications (seit 2016)
- Sprecher des SFB/TRR 154 „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken“ (seit 2014)
- Mit-Herausgeber von EMS series in Industrial and Applied Mathematics (seit 2013)
- Mit-Herausgeber des Vietnam Journal of Mathematics (seit 2011)
- Mitglied des Beirats von EURO Journal on Computational Optimization (seit 2011)
- Bereichsleiter von Optimization Online, www.optimization-online.org (seit 2010)
- Mit-Herausgeber von Discrete Optimization (2009 - 2018)
- Mit-Herausgeber von Mathematical Programming C (seit 2008)
- BMBF Fachgutachter für „Mathematik“ (seit 2007)

Die Arbeit von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern wurde im Jahr 2019 mit folgenden Preisen ausgezeichnet:

- **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.
- **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.

Im Bereich Energiemarktdesign waren im Jahr 2019 folgende Personen zu Gast:

- 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.

Presseauftritte:

- Ismer, R.; K. Neuhoff. Handelsblatt, Gastkommentar: CO₂-Bepreisung: Warum die Anpassung der Energiesteuer ein gutes Instrument wäre, 17.09.2019.
- Grimm, V.; Nanu? (Kinderzeitung der Nürnberger Nachrichten) Nr.04 2019 „Wieso steht bei Tankstellenpreisen immer eine kleine 9 und warum schwanken die Benzinpreise ständig?“
- Grimm, V., L. Wößmann. FAZ Gastkommentar „Bildungschancen sind der Schlüssel“, 29.04.2019
- Grimm, V.; Nürnberger Zeitung, Interview „Eine CO₂-Bepreisung ist der einfachste Weg“, 18.07.2019
- Grimm, V.; Yahoo Nachrichten, Interview „Was wäre, wenn Deutschland das Benzin ausgeben würde?“, 22.07.2019
- Grimm, V.; Mittelbayerische, Interview „Wasserstoff, das Öl der Zukunft“. Prof. Dr. Veronika Grimm, Leiterin des neuen Zentrums Wasserstoff.Bayern, spricht über das Potenzial von Wasserstoff, 26.11.2019
- Grimm, V.; Studiogast in der Frankenschau zum Thema Wasserstoff, 19.01.2020

6 Ausgerichtete Workshops

- [1] 7. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 17.01.2019
- [2] 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.
- [3] 8. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 10.05.2019
- [4] NUEdialog 2019: Panel „Die Mobilitätswende: Antriebe der Zukunft“, Nürnberg, 23.05.2019
- [5] „Friday@Noon - Bavarian Workshop on Optimization“ (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg, Universität Augsburg und TU München), Energie Campus Nürnberg, 12.07.2019
- [6] 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
- [7] 9. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 06.12.2019

7 Gutachten

- [1] Gutachten für die Monopolkommission „Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung“, V. Grimm, G. Zöttl und C. Sölch (2017)
- [2] Gutachten für die N-Ergie AG „Dezentralität und Zellulare Optimierung“, V. Grimm, G. Zöttl, M. Ambrosius, B. Rückel, C. Sölch und Prognos AG (2016)

8 Veröffentlichungen

- Ambrosius M.; J. Egerer; V. Grimm; A.H. van der Weijde (2020a). The role of expectations for market design – on structural regulatory uncertainty in electricity markets. *European Journal of Operational Research*. Online first. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.024>
- Aßmann D.; F. Liers; M. Stingl (2018). Decomposable Robust Two-Stage Optimization: An Application to Gas Network Operations Under Uncertainty. *Networks*, Bd. 74 (1), S. 40–61. <https://doi.org/10.1002/net.21871>
- Bohlayer M.; F. Markus; M. Braun; G. Zöttl (2020). Energy-intense production-inventory planning with participation in sequential energy markets. *Applied Energy*. Bd. 258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113954>
- Bohlayer M.; G. Zöttl (2018). Low-Grade Waste Heat Integration in Distributed Energy Generation Systems - An Economic Optimization Approach. *Energy*, Bd. 159, S. 327–343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.095>
- Burlacu R.; H. Egger; M. Groß; A. Martin; M. Pfetsch; L. Schewe; M. Sirvent; M. Skutella (2019). Maximizing the storage capacity of gas networks: a global minlp approach. *Optimization and Engineering*, Bd. 20, S. 543–573, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9414-5>
- Geißler B.; A. Morsi; L. Schewe; M. Schmidt (2018). Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods. *INFORMS Journal on Computing*, Bd. 30, S. 309–323. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2017.0780>
- Grimm V.; J. Grübel; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2020). Storage investment and network expansion in distribution networks: The impact of regulatory frameworks. *Applied Energy*. Bd. 262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114017>
- Grimm V.; S. Kretschmer; S. Mehl (2019). Diffusion of green innovations: The organizational setup of pilot projects and its influence on consumer perceptions. SSRN Electronic Journal, forthcoming, *Energy Policy*. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3417116>
- Grimm V.; J. Grübel; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019a). Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. *European Journal of Operational Research*, Bd. 273 (3), S. 1097–1108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.016>
- Grimm V.; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2019b). Optimal price zones in electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches. *Optimization Methods & Software*, Bd. 34 (2), S. 406–436. <https://doi.org/10.1080/10556788.2017.1401069>
- Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2019c). Regionally differentiated network fees to affect incentives for generation investment. *Energy*, Bd. 177, S. 487–502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.035>
- Grimm V.; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019d). A multilevel model of the European entry-exit gas market. *Mathematical Methods of Operations Research*, Bd. 89 (2), S. 223–255. <https://doi.org/10.1007/s00186-018-0647-z>
- Grimm V.; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2016). Transmission and generation investment in electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. *European Journal of Operational Research*, Bd. 254, S. 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.044>
- Grübel J.; T. Kleinert; V. Krebs; G. Orlinskaya; L. Schewe; M. Schmidt; J. Thürauf (2020). On electricity market equilibria with storages: Modeling, uniqueness, and a distributed ADMM. *Computers & Operations Research*, Bd. 114. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104783>
- Haußner M.; R. Ismer (2018). Betrieb von Stromspeichern durch Verteilernetzbetreiber: Eine Analyse des aktuellen Entflechtungsregimes und der geplanten Änderungen durch das Winterpaket der Europäischen Kommission. *Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft*. Bd. 7 (13), S. 51–59.
- Hiller B.; T. Koch; L. Schewe; R. Schwarz; J. Schweiger (2018). A system to evaluate gas network capacities: Concepts and implementation. *European Journal of Operational Research*, Bd. 270, S. 797–808. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.035>

- Ismer R.; M. Haußner; K. Meßerschmidt; K. Neuhoff (2019a). Sozialverträglicher CO₂-Preis: Vorschlag für einen Pro-Kopf-Bonus im Rahmen des Krankenversicherungssystems. *Zeitschrift für Umweltrecht ZUR*, 664–675.
- Kleinert T.; M. Labbé; F. Plein; M. Schmidt (2019). There's No Free Lunch: On the Hardness of Choosing a Correct Big-M in Bilevel Optimization. Optimization Online, forthcoming, *Operations Research*.
http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/04/7172.html
- Kleinert T.; M. Schmidt (2019a). Computing Feasible Points of Bilevel Problems with a Penalty Alternating Direction Method. Optimization Online, forthcoming, *INFORMS Journal on Computing*.
http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/03/7117.html
- Kleinert T.; M. Schmidt (2019b). Global optimization of multilevel electricity market models including network design and graph partitioning. *Discrete Optimization*, Bd. 33, S. 43–69.
<https://doi.org/10.1016/j.disopt.2019.02.002>
- Krebs V.; L. Schewe; M. Schmidt (2018). Uniqueness and multiplicity of market equilibria on DC power flow networks. *European Journal of Operational Research*, Bd. 271, S. 165–178.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.016>
- Krebs V.; M. Schmidt (2018). Uniqueness of Market Equilibria on Networks with Transport Costs. *Operations Research Perspectives*, Bd. 5, S. 169–173. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.05.002>
- Kufner T.; G. Leugering; A. Martin; J. Medgenberg; J. Schelbert; L. Schewe; M. Stingl; C. Strohmeier; M. Walther (2019). Towards a lifecycle oriented design of infrastructure by mathematical optimization. *Optimization and Engineering*, Bd. 20, S. 215–249. <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9406-5>
- Labbé M.; F. Plein; M. Schmidt (2020). Bookings in the European Gas Market: Characterisation of Feasibility and Computational Complexity Results. Optimization and Engineering. Bd. 21 (1), S. 305–334.
<https://doi.org/10.1007/s11081-019-09447-0>
- Lang L.; B. Dallinger; G. Lettner (2020). The meaning of flow-based market coupling on redispatch measures in Austria. *Energy Policy*, Bd. 136. Online first. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111061>
- Reuß M.; L. Welder; J. Thürauf; J. Linßen; T. Grube; L. Schewe; M. Schmidt; D. Stolten; M. Robinius (2019). Modeling hydrogen networks for future energy systems: A comparison of linear and nonlinear approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 44 (60), S. 32136–32150.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.080>
- Robinius M.; L. Schewe; M. Schmidt; D. Stolten; J. Thürauf; L. Welder (2019). Robust optimal discrete arc sizing for tree-shaped potential networks. *Computational Optimization and Applications*. Bd. 73 (3), S. 791–819.
<https://doi.org/10.1007/s10589-019-00085-x>
- Runge P.; C. Sölch; J. Albert; P. Wasserscheid; G. Zöttl; V. Grimm (2019). Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy*, Bd. 233–234, S. 1078–1093.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.023>
- Schewe L.; M. Schmidt; J. Thürauf (2019). Structural Properties of Feasible Bookings in the European Entry-Exit Gas Market System. *4OR-A Quarterly Journal of Operations Research*. Online first, S. 1–22.
<https://doi.org/10.1007/s10288-019-00411-3>

Preprints und eingereichte Arbeiten:

- Ambrosius M.; J. Egerer; V. Grimm; A.H. van der Weijde (2020b). Risk Aversion in Multilevel Electricity Market Models with Different Congestion Pricing Regimes. SSRN Electronic Journal.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3541599>
- Ambrosius M.; V. Grimm; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2020c). Endogenous Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multilevel Optimization with Graph Partitioning. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/10/6868.html
- Ambrosius M.; V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2019). Data Documentation for the German Electricity Market used for the calibration of the GATE Model - NDP 2025 (Version 2015). SSRN Electronic Journal.
<http://doi.org/10.2139/ssrn.3365830>
- Bichler M.; V. Grimm; S. Kretschmer; P. Sutterer (2019). Market Design for Renewable Energy Auctions: An Analysis of Alternative Auction Formats. SSRN Electronic Journal. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3417550>

- Egerer J.; V. Grimm; T. Kleinert; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). The Impact of Neighboring Markets on Renewable Locations, Transmission Expansion, and Generation Investment. SSRN Electronic Journal. <http://doi.org/10.2139/ssrn.3498339>
- Grimm V.; G. Orlinskaya; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019e). Optimal Design of Retailer-Prosumer Electricity Tariffs Using Bilevel Optimization. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/07/7297.html
- Grimm V.; S. Kretschmer; S. Mehl (2018). Diffusion of Green Innovations: Evidence from a Field Study on Domestic Electricity Storage. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3122235>
- Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2018). The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3235262>
- Ismer R.; M. Haußner; K. Meßerschmidt; K. Neuhoß (2019b). Sozialverträglicher CO₂-Preis: Vorschlag für einen Pro-Kopf-Bonus durch Krankenversicherungen. DIW aktuell 21 / 2019. ISSN: 2567-3971. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.673213.de/diw_aktuell_21.pdf
- Kleinert T.; V. Grimm; M. Schmidt (2019). Outer Approximation for Global Optimization of Mixed-Integer Quadratic Bilevel Problems. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/12/7534.html
- Krebs V.; M. Schmid (2019). Γ -Robust Linear Complementarity Problems. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/03/7107.html
- Krebs V.; M. Müller; M. Schmid (2019). Gamma-Robust Linear Complementarity Problems with Ellipsoidal Uncertainty Sets. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/10/7434.html
- Labbé M.; F. Plein; M. Schmidt; J. Thürauf (2019). Deciding Feasibility of a Booking in the European Gas Market on a Cycle is in P. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/11/7472.html
- Liers F.; A. Martin; M. Merkert; N. Mertens; D. Michaels (2020). Towards the Solution of Mixed-Integer Nonlinear Optimization Problems using Simultaneous Convexification. <https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/frontdoor/index/index/searchtype/latest/docId/303/start/0/rows/10>
- Liers F.; L. Schewe; J. Thürauf (2019). Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems. Optimization Online. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2019/05/7219.html

Dissertationen:

- [1] Dr. Manuel Haußner: Including Consumption into Emissions Trading – Economic Rationality, EU Law Conformity, WTO Law Compatibility and Practical Administration (Betreuer: Prof. Dr. Roland Ismer)
- [2] 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)
- [3] Dr. Bastian Rückel: The Impact of Market Design on the Coordination of Agents in Liberalized Electricity Markets (Betreuer: Prof. Dr. Gregor Zöttl)
- [4] 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)
- [5] 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)

9 Vorträge und Poster

- [1] M. Ambrosius. The Role of Expectations for Market Design - on Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 29.01.2019
- [2] S. Kretschmer. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. VII International Academic Symposium (IEB), Barcelona, 05.02.2019
- [3] V. Grimm. Impulsvortrag zur Industriestrategie anlässlich des Besuchs von BM Altmaier beim Wissenschaftlichen Beirat des BMWi, Berlin, 07.02.2019

- [4] L. Lang. Modelling congestion management in the context of flow-based market coupling. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT), Wien, 13.02.2019
- [5] 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
- [6] 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
- [7] J. Thürauf. Robust Optimal Hydrogen Tree-Shaped Network Design. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 21.02.2019
- [8] S. Kretschmer. The organizational setup of pilot projects – Influence on consumer perceptions. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 22.02.2019
- [9] G. Orlinskaya. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. Bavarian Berlin Energy Research Seminar, München, 22.02.2019
- [10] V. Grimm. Forschungsvortrag zu Auszügen aus dem Projekt Energiemarktdesign, Tagung des Fachbeirats des EnCN, Nürnberg, 29.03.2019
- [11] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. ENERDAY, Dresden, 12.04.2019
- [12] 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
- [13] F. Liers. Robust Discrete Optimization: Globalized Gamma-Robustness and Radius of Robust Feasibility. Seminarvortrag, Imperial College, 02.05.2019
- [14] J. Egerer. Die Energiewende in Deutschland. XXII. dialog-Symposium zum Thema „Zukunftsperspektiven erneuerbarer Energien in Deutschland und Russland“, Tübingen, 18.05.2019
- [15] J. Egerer. Gefahr des strategischen Bietens / Liquidität des Smart Market. Workshop im Projekt „SmartBio – Biogasanlagen als Akteur am Smart Market“, Rosenheim, 20.05.2019
- [16] V. Grimm. NUEdialog 2019: Panel „Die Mobilitätswende: Antriebe der Zukunft“, Impulsvortrag und Panelistin, Nürnberg, 23.05.2019
- [17] 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
- [18] 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
- [19] M. Ambrosius. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 25.06.2019
- [20] J. Egerer. Structural Regulatory Uncertainty in Electricity Markets. 30th European Conference on Operational Research (EURO), Dublin, 25.06.2019
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] A. Martin. Datenanalyse, KI und Optimierung für eine (Energie) Effiziente Versorgung. Workshop "Energie.Digital: Künstliche Intelligenz als Treiber der Energiewende", Nürnberg, 11.07.2019

- [27] 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
- [28] V. Grimm. Social Market Economy and Energy Policy, International Summer School "Social Market Economy", Nürnberg, 26.07.2019
- [29] 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
- [30] 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
- [31] F. Liers. Robust Optimization for Energy Applications. Semi-Plenary at the 6th International Conference on Continuous Optimization (ICCOPT), Berlin, 07.08.2019
- [32] 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
- [33] V. Grimm. Die Rolle von Wasserstoff für die Energiewende, Versammlung der Freien Wähler, EnCN, Nürnberg, 07.09.2010
- [34] R. Ismer. Nationale CO₂-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
- [35] 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
- [36] 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
- [37] T. Kleinert. Bilevel Optimization - Recent Results. Invited Talk at NEC Laboratories Europe GmbH, Heidelberg, 02.10.2019
- [38] V. Grimm. Vorstellung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B), Kommunale 2019 (Bundesweite Fachmesse und Kongress), Messe Nürnberg, 16.10.2019
- [39] 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
- [40] V. Grimm. Wie sieht die Mobilität der Zukunft aus? Alternative Antriebe. Lange Nacht der Wissenschaften, EnCN, Nürnberg 19.10.2019
- [41] V. Grimm. Wie sieht die Mobilität der Zukunft aus? Alternative Antriebe. Lange Nacht der Wissenschaften, Friedrich-Alexander-Universität (Findelgasse), Nürnberg, 19.10.2019
- [42] 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
- [43] V. Grimm. Panelistin auf den Nürnberger Gesprächen zum Thema "Unser Klima retten und unsere Jobs: Geht das überhaupt?", Nürnberg, 21.10.2019
- [44] M. Ambrosius. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 19.11.2019
- [45] V. Grimm. Marktregeln und Sektorkopplung: Die Mobilität der Zukunft, Jahrestagung des EnCN, Nürnberg 05.12.2019
- [46] J. Egerer. Risk Aversion in Uncertain Electricity Markets with Different Pricing Schemes. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [47] J. Grübel. On Electricity Market Equilibria with Storage: Modeling, Uniqueness, and a Distributed ADMM. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [48] T. Kleinert. Zweistufige Optimierungsprobleme - Eine Einführung. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [49] P. Runge. Economic comparison of electric fuels produced at excellent sites for renewable energies: A scenario for 2035. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019
- [50] J. Thürauf. Uncertainties in Energy Networks: How Optimization Can Help. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019

- [51] V. Grimm. Vorstellung des Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) auf der Vollversammlung der IHK Nürnberg für Mittelfranken, Nürnberg, 10.12.2019
- [52] J. Thürauf. Radius of Robust Feasibility for Mixed-Integer Problems. Optimization Seminar Edinburgh, Edinburgh, 11.12.2019
- [53] J. Thürauf. Robust Optimal Hydrogen Tree-shaped Network Design. Energy Seminar Edinburgh, Edinburgh, 12.12.2019

10 Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten

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

- [1] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [2] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2019
- [3] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2019
- [4] Vorlesung Discrete Optimization II. Prof. Dr. Alexander Martin. Sommersemester 2019
- [5] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [6] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [7] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2019
- [8] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2019/2020
- [9] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2019/2020
- [10] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2019/2020
- [11] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020
- [12] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2019/2020
- [13] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2019/2020
- [14] Vorlesung Mathematical Optimization for Communications & Signal Processing. Prof. Dr. Frauke Liers. Wintersemester 2019/2020
- [15] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020
- [16] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2019/2020

Betreute Bachelorarbeiten:

- [1] Entwicklung und Perspektiven der EEG Umlage. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Auswirkungen von Elektromobilität auf die Verteilernetzinfrastruktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Mentale Rebound-Effekte bei Effizienzsteigerungen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [4] Guter Wille, kleine Wirkung? Der Einfluss des Umweltbewusstseins auf die persönliche CO₂-Bilanz. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [5] Determinanten des Wechselverhaltens von Endkunden im Energiesektor. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [6] Klimaneutrale Energieszenarien für Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [7] Carbon taxation: Options for avoiding regressivity. Prof. Dr. Roland Ismer
- [8] Vergleich der Ökobilanzen von wasserstoff- und batterieelektrischer Mobilität anhand einer Lebenszyklusanalyse. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [9] Vergleich verschiedener E-Fuels in einem Szenario für 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Wie viel Speicher braucht die Deutsche Energiewende? Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Die Bedeutung und Verwendung von Informationen in Smart Grids. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [12] Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffspeichern in einem Energieszenario 2030. Prof. Dr. Gregor Zöttl

Betreute Masterarbeiten:

- [1] Es weht ein frischer Wind durch Deutschland – Herausforderungen von Power Purchase Agreements für Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Multilevel Model for Joint Analysis of Electricity and Gas Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] The value of flexibility in industrial electricity demand – A model-based evaluation for the German electricity market. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [4] Ein mehrstufiges Modell zur Analyse von robustheitsbedingten Ineffizienzen im europäischen Entry-Exit-Gasmarkt. Prof. Dr. Frauke Liers / Prof. Dr. Veronika Grimm
- [5] AC Optimal Power Flow with Chance Constraints. Prof. Dr. Frauke Liers
- [6] A Temporal Decomposition Approach of Energy Systems Models using Lagrangian Relaxation. Prof. Dr. Alexander Martin
- [7] Presolve-Verfahren für Lineare Bilevelprobleme. Prof. Dr. Alexander Martin
- [8] Gamma-robust linear complementarity problems under ellipsoidal uncertainty with applications to the traffic equilibrium problem. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [9] Kosteneffizienter Betrieb von Smart Grids mit Gomory Schnittebenen. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [10] Mixed integer moving horizon control for flexible energy storage systems. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [11] Γ -robust linear complementarity problems under ellipsoidal uncertainty with application to the traffic equilibrium problem. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [12] Modelling Balancing Energy Markets. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [13] Markt- und netzorientierter Einsatz nachfrageseitiger Flexibilität durch Smart Meter. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [14] Analysis of Bidding Zones in Europe. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [15] CO₂-Bepreisung und Vermeidung von Carbon Leakage. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [16] Alternative drives: Vehicle purchase decisions under different market design scenarios. Prof. Dr. Gregor Zöttl

FORSCHUNGSBEREICH

Erneuerbare Energien



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Christoph Brabec

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

E-Mail
christoph.brabec@encn.de

Telefon
+49 9131 / 9398 100

Web
www.encn.de/EET

EE-Technologien im urbanen Umfeld – EET

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

Projektbericht 2019

Die Photovoltaik (PV) muss raschen Einzug in die Städte finden, damit Strom dort erzeugt wird, wo er auch verbraucht wird. Folglich sind neue PV-Technologien zu entwickeln, die in Gebäude integriert werden können und somit eine bedarfsgerechte und kostengünstige Stromerzeugung im urbanen Raum erlauben. Neben der Bauwerksintegration bietet die Stromversorgung mobiler Verbraucher neue Möglichkeiten für die PV. Beide Anwendungen erfordern Eigenschaften der PV-Module, die von herkömmlichen Technologien nicht zu leisten sind, wie Leichtigkeit, Flexibilität, optische Attraktivität sowie gute Integrierbarkeit. Das Projekt EET stellt sich diesen Herausforderungen durch die Entwicklung geeigneter PV-Technologien und entsprechender effizienter Produktionsverfahren.

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

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

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

Im **Projektteil TP4 – Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld (Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden 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@encn.de

Telefon
+49 9131 9398 100

Web
www.encn.de

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

1.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: ZAE Bayern

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

1.2 Arbeiten und Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt den Arbeits- und Zeitplan des Teilprojektes „2D- und 3D-Freiform Beschichtungsprozesse zur Herstellung von PV-Elementen für das urbane Umfeld“ (TP1). Im Jahr 2019 wurden alle drei Arbeitspakete, wie im Folgenden näher erläutert, vorangetrieben. Der Fokus lag dabei auf den Arbeitspaketen 1 und 2.

Tabelle 1: Schematische Darstellung des Arbeitsplans (TP1), jeder Abschnitt der Tabelle bezeichnet ein Halbjahr. Die schattierten Zellen bezeichnen die geplante Dauer der APs, die Meilensteine sind als M und die Übergabepunkte als Ü bezeichnet.

	2017		2018		2019		2020		2021	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
AP 1 2D-Druck						M1P		Ü1P M2P		
AP 2 3D-Druck						M1D				M2D
AP 3 In-line QC			Ü1Q			M1Q	Ü2Q		Ü3Q	

1.2.1 Organische Photovoltaik-Module mit Weltrekordeffizienz

Die organische Photovoltaik (OPV) weist gegenüber herkömmlichen Technologien etliche Vorteile auf, wie bspw. Flexibilität, Semitransparenz, eine nahezu beliebige Farbpalette und geringes Gewicht. Dennoch spielen, wie für jede andere PV-Technologie, die Gestehungskosten der damit produzierten Elektrizität (LCOE - levelized cost of electricity) für den ökonomischen Erfolg der OPV eine entscheidende Rolle. Die LCOE wiederum hängt unmittelbar von der Effizienz eines Solarmoduls ab. Während die Effizienzen organischer Solarzellen im Labormaßstab in den letzten Jahren durch die Entwicklung der sog. „Non Fullerene“-Akzeptoren eine entscheidende Steigerung auf bis zu 16% erfuhren, hatte die Entwicklung effizienter großflächiger Solarmodule seit 2012 bei 9% stagniert (Abbildung 1).

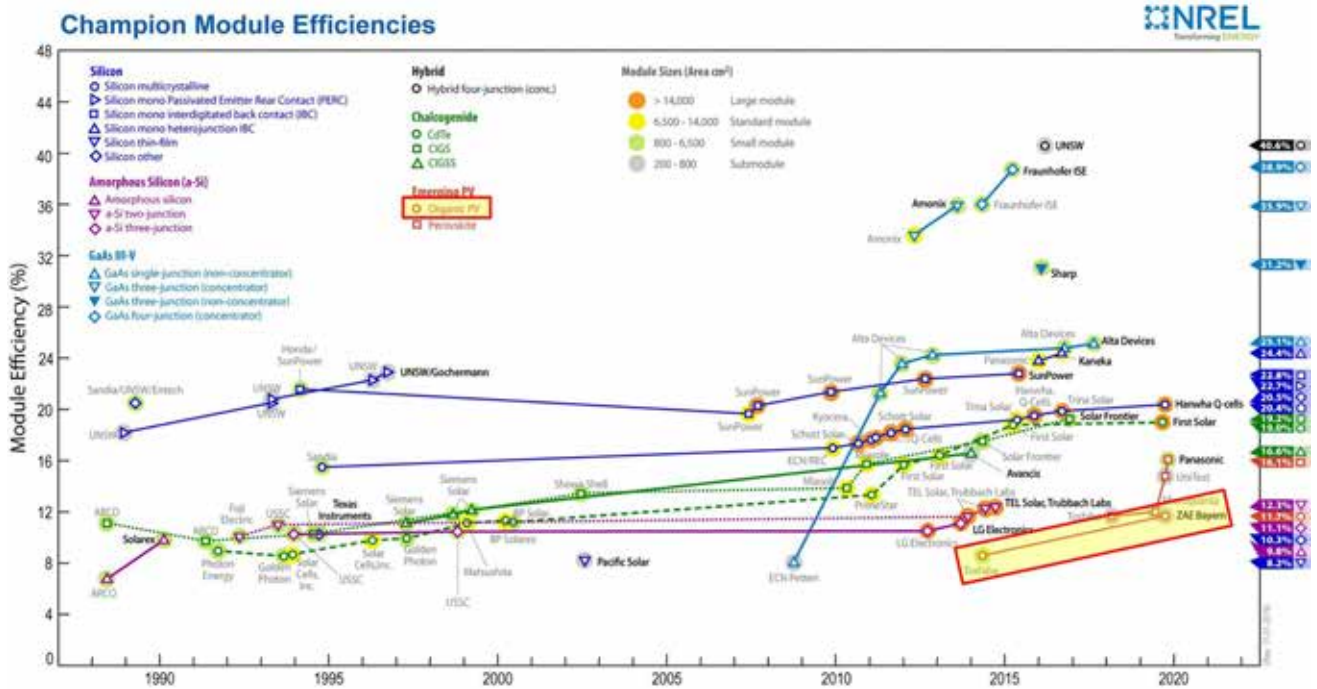


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Rekorderffizienzen von PV-Modulen. (<https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>, abgerufen am 1. November 2019)

Im abgelaufenen Jahr gelang es der „Solarfabrik der Zukunft“ (SFF) des ZAE Bayern im Rahmen des Projekts EET, Module mit Effizienzen oberhalb der psychologisch wichtigen Marke von 10% zu entwickeln. Mit den erreichten, vom Fraunhofer ISE zertifizierten Effizienzen von 12,6% und 11,7% für Module mit Flächen von 26 cm² bzw. 204 cm² hält das ZAE Bayern damit momentan den Weltrekord für organische Photovoltaik (Abbildung 1). Damit konnte gezeigt werden, dass die OPV-Technologie das Potential hat, auch im industriell relevanten Maßstab zu den anderen Dünnschicht PV-Technologien aufzuschließen.

Erreicht wurde dieser Rekord einerseits durch die Kooperation mit der South China University of Technology, die das hocheffiziente Material, das Donorpolymer PM6 und den Akzeptor Y6, zur Verfügung stellte, und andererseits durch das an der SFF vorhandene know how zum elektrischen Layout organischer Solarmodule, zur Prozessierung organischer Materialien aus Lösung und zur Laserstrukturierung. Durch dieses know how werden die üblicherweise beim Übergang von der 0,1 cm² großen Laborzelle zum großflächigen Solarmodul auftretenden Effizienzverluste auf ein Minimum reduziert. Das in Abbildung 2 gezeigte Weltrekord-Modul besteht aus 32 seriell verschalteten Zellen von jeweils 4 mm Breite, wodurch Leistungsverluste durch Serienwiderstände minimiert werden. Die monolithische Verschaltung der Zellen erfolgt mittels Laserstrukturierung, herkömmlicherweise durch Ablation der P1-, P2- und P3-Linien (Abbildung 3). Dadurch lassen sich die Flächen der photoelektrisch inaktiven Verschaltungsbereiche („Interconnects“) auf ein Minimum reduzieren. Um zu vermeiden, dass Leistungsverluste durch die elektrischen Widerstände der Interconnects entstehen, muss dafür gesorgt werden, dass die aktiven Schichten im P2-Schritt restlos ablatiert werden. Um dies in einem einzigen Schritt zu erreichen, wären extrem hohe Laserpulsenergien notwendig gewesen, was wiederum Kollateralschäden durch Reflexionen an Grenzflächen verursacht hätte. Dies konnte durch die Einführung eines P2a-Strukturierungsschrittes vermieden werden, der die Elektronenextraktionsschicht vor der Abscheidung der PM6:Y6-Schicht ablatiert, die danach im eigentlichen P2-Schritt entfernt wird (Abbildung 3). Die in Kooperation mit dem Projektpartner iMEET der Friedrich-Alexander-Universität im Rahmen des Teilprojekts 2 durchgeführte Qualitätskontrolle des Moduls mittels bildgebender Photo- und Elektrolumineszenz (Abbildung 4) zeigt eine extrem geringe Defektdichte sowohl in der aktiven Schicht als auch in den Ladungsextraktionsschichten und bestätigt damit die hohe Qualität sowohl der Abscheidung als auch der Laserstrukturierung der Schichten. Die Qualität aller fünf Schichten ist reproduzierbar gut, so dass die Produktionsausbeute bei 100 % liegt.

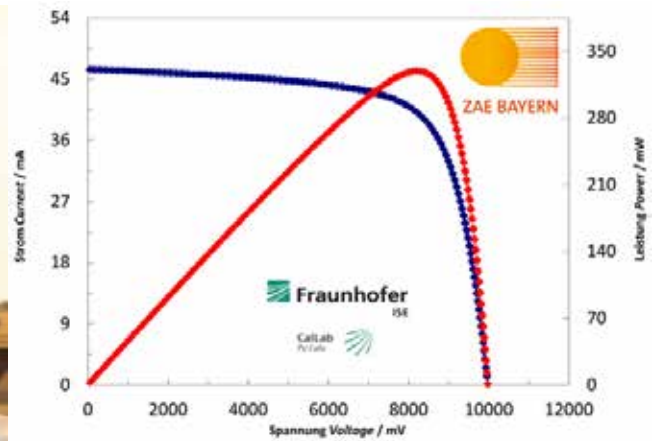
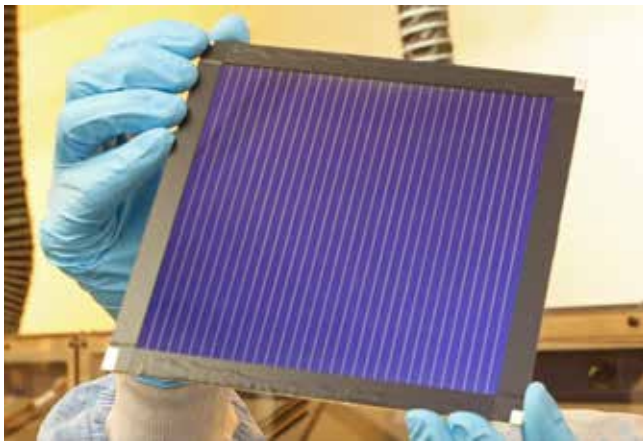


Abbildung 2: OPV-Modul (links: Foto, rechts: Strom-Spannungs- und Leistungs-Charakteristik) mit einer Weltrekord-Effizienz von 11,7% auf einer Fläche von 204 cm².

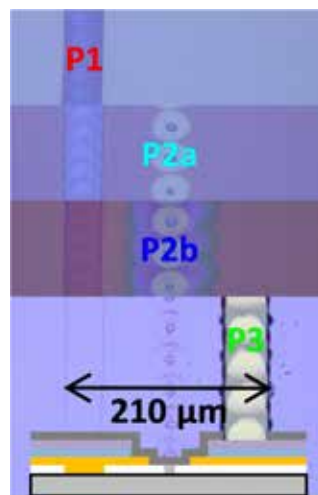


Abbildung 3: Querschnitt durch einen Interconnect mit den Laserstrukturierungsschritten P1, P2 und P3 eines OPV-Moduls mit einem speziell entwickelten zweistufigen P2-Prozesses.

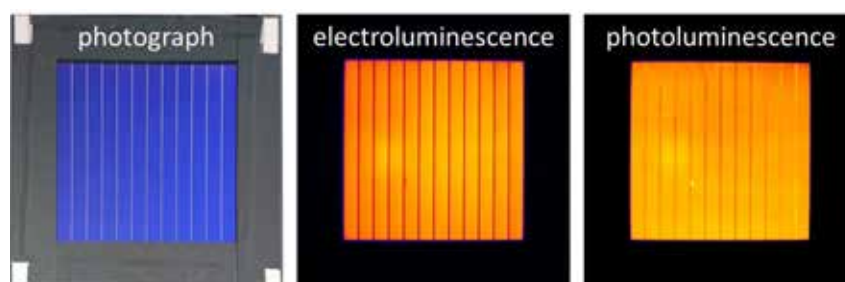


Abbildung 4: Qualitätskontrolle der Weltrekordmodule mittels bildgebender Elektro- und Photolumineszenz

Die nächste Herausforderung wird darin bestehen, die Architektur der Weltrekord OPV-Module so zu modifizieren, dass sie in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess gefertigt werden können. Dazu muss u.a. die obere Elektrode, die bislang noch aus aufgedampftem Silber besteht, durch eine lösungsprozessierte Elektrode aus Silbernanodrähten ersetzt werden, ohne dass dadurch die darunterliegenden Schichten beeinträchtigt werden.

1.2.2 Funktionalisierung dreidimensionaler Objekte mit gedruckter (Opto-)Elektronik

Ein großer Vorteil der gedruckten Elektronik ist die Möglichkeit, Bauelemente wie organische Solarzellen, Photodetektoren oder organische Leuchtdioden auf nahezu beliebige Substrate aufzubringen. Aufgrund der sehr ähnlichen Architektur dieser Bauelemente ist die Prozessierung zudem weitgehend gleich, wodurch Entwicklungen bei einer der Technologien unmittelbar auf die anderen übertragen werden können. Besonders in der Automobil-, Medizin- und Energietechnik wird die Kombination aus gedruckter (Opto-)Elektronik und 3D-Oberflächen in naher Zukunft eine wichtige Rolle spielen, beispielsweise für den Direktdruck von Beleuchtungselementen auf Fahrzeug-Karosserien. Im Forschungsprojekt OLE3D bündeln das ZAE Bayern und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der FAU ihre Kompetenzen, um durch die Kombination von Robotik, Tintenstrahl- und Aerosoljet-Druck von organischen Solarzellen und organischen Leuchtdioden sowie der „Surface mounted technology“ hochleistungsfähige Hybridbauteile herzustellen. Im Jahr 2019 wurde in Zusammenarbeit mit der Neotech GmbH der Aufbau des 5-Achs-Roboters mit integrierter Tintenstrahl Druckeinheit abgeschlossen (Abbildung 5). Im Jahr 2020 werden mit Hilfe dieses Systems 3D Demonstratoren mit direkt aufgedruckten OPV-Modulen bzw. OLEDs hergestellt.

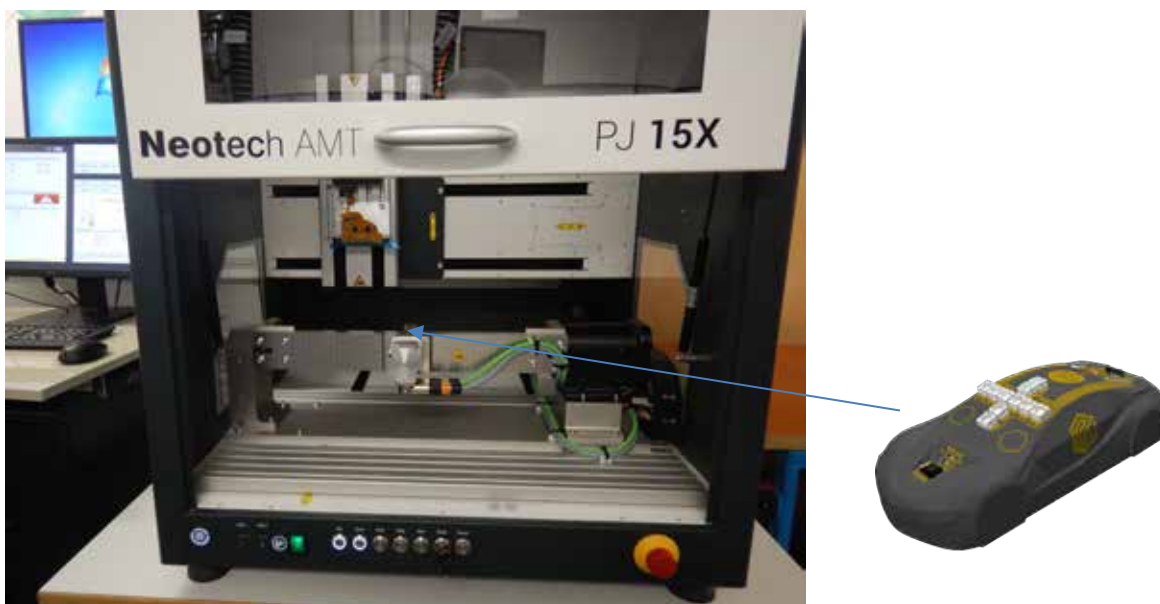


Abbildung 5: 5-Achs-Roboter der Fa. Neotech AMT mit Spectra S-Tintenstrahlkopf und 3D-Objekt „MIDster“

1.3 Kooperationen

Die Entwicklung der Weltrekord OPV-Module erfolgte in Kooperation mit der South China University of Technology (Material), dem Lehrstuhl iMEET der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Qualitätskontrolle im Rahmen des EET-Teilprojekts 2) und dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (Optimierung von Prozessparametern mit Hochdurchsatz-Methoden).

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

Im Jahr 2019 wurde außerdem das ZIM-Projekt „Low Haze“ begonnen, in dem gemeinsam mit der RAS GmbH (Regensburg) die Aufbringung von transparenten Elektroden aus Silbernanodrähten auf flexible Substrate mittels Flexodruck optimiert wird.

1.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Die Personal- und Sachmittel wurden vollständig ausgeschöpft. Ein Großteil der Versuche konnte mit der bestehenden Infrastruktur durchgeführt werden. Hierfür war es notwendig, einen Teil des Investitionsbudgets für Reparaturen einzusetzen. Das verbleibende Investitionsbudget wird für die Installation von in-line-QC-Geräten eingesetzt. Damit können alle im Antrag beschriebenen Arbeiten durchgeführt werden.

1.5 Ausblick

Ausgehend von den oben beschriebenen Weltrekordmodulen werden im kommenden Projektjahr Solarmodule entwickelt, die sich vollständig aus umweltverträglichen Lösungsmitteln prozessieren und somit im industriellen Maßstab mittels Rolle-zu-Rolle-Verfahren drucken lassen. Die dadurch erreichte Senkung der Produktionskosten wird dazu beitragen, die Gestehungskosten für Solarstrom weiter zu reduzieren.

Im Rahmen des AiF-Projekts OLE3D werden mit Hilfe des im abgelaufenen Projektjahr entwickelten 5-Achs-Tintenstrahl-Druckers OPV-Module, Photodioden und OLEDs auf 3D Oberflächen gedruckt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit charakterisiert. Mit den am Projekt beteiligten Firmen werden mögliche Anwendungen diskutiert und entsprechende Folgeprojekte geplant.

2 Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse

2.1 Bildgebende Defektanalyse

Im Rahmen des Projekts EET werden völlig neue Beschichtungsverfahren entwickelt, mit denen fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld umgesetzt wird. Insbesondere die Prozessführung und Zusammensetzung der verwendeten Tintenformulierungen sowie der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Bauteilstabilität spielt dabei eine entscheidende Rolle. Mit hochaufgelösten Photolumineszenz (PL)-Imaging-Methoden sind bereits effektive Tools entwickelt worden, um die Beschichtungsqualität in Teilprojekt 4 gefertigter semitransparenter Module zu charakterisieren. Des Weiteren hatten erste Ergebnisse zur Überprüfung der Bauteilstabilität mit Hilfe von Elektrolumineszenz (EL) wichtige Informationen zur Schadensanalyse bereitgestellt. Eine eindeutige Identifizierung der Versagensmechanismen ist damit jedoch noch nicht möglich, da die EL-Bilder von vielen Faktoren gleichzeitig beeinflusst werden. Zum einen können Defekte in der aktiven Schicht in Bezug auf Schichtdicke oder Komposition sichtbare Veränderungen hervorrufen, zum anderen sind auch Degradationseffekte an den Elektroden ein wesentlicher Faktor, der Stromfluss und damit auch die Elektrolumineszenz-Bilder beeinflusst. Zur systematischen Untersuchung, wie Defekte in der Top- und Bottom-Elektrode im EL-Bild erkennbar sind und welche Degradationseffekte durch diese Defekte hervorgerufen werden können, wurden gezielt Defekte in Referenzsolarzellen eingebracht und diese anschließend gealtert. Hierzu wurde mit Hilfe eines Femtosekunden-Lasers an kreisrunden Stellen gezielt ein Teil der jeweiligen Elektrode abgetragen.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeiten ist, dass sich Defekte in der Zinkoxid (ZnO) und Molybdänoxid (MoO_x) Elektrode zwar in ähnlicher Weise auf das EL-Bild auswirken, jedoch durch eine zusätzliche PL-Messung, in der nur die ZnO-Defekte sichtbar sind, unterscheiden lassen (Abbildung 6). Des Weiteren hat ein Defekt in der ZnO-Schicht direkten Einfluss auf die Degradationsprozesse in den untersuchten Solarzellen, während der MoO_x-Defekt keine Veränderungen während der Degradation zeigt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist eine lichtinduzierte Desorption von Sauerstoff aus dem ZnO, die aktuell intensiver untersucht wird.

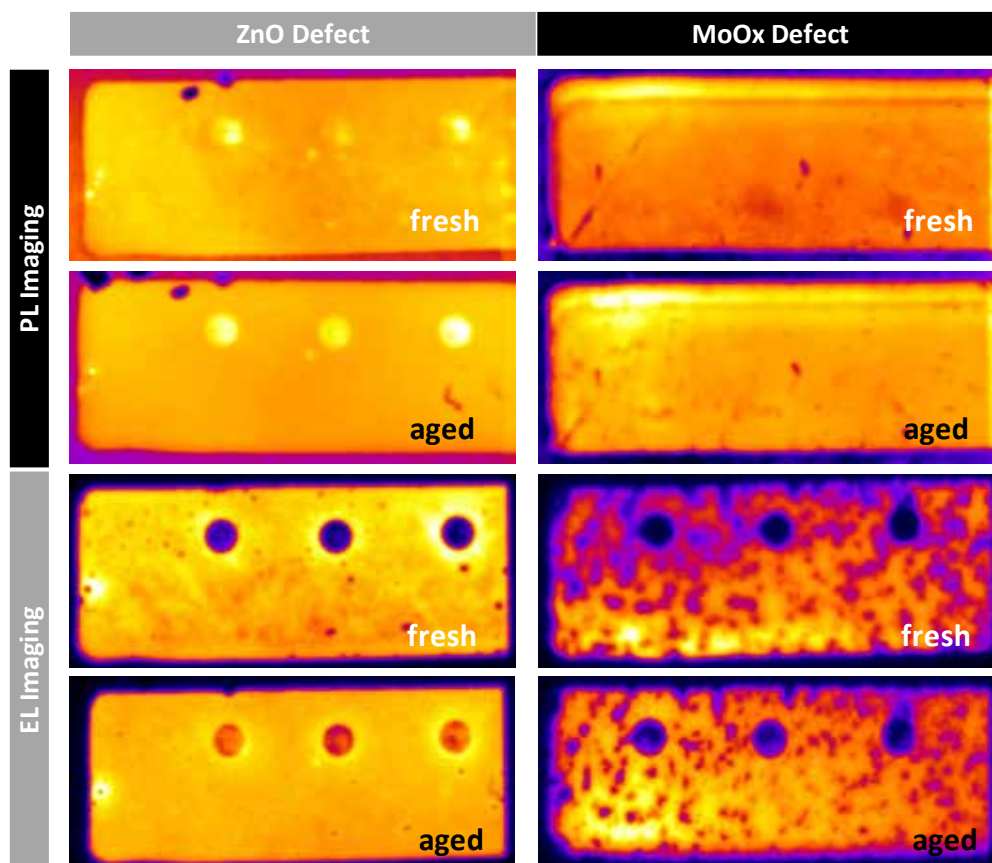


Abbildung 6: Photolumineszenz (PL)- und Elektrolumineszenz (EL)-Bilder einer Referenzsolarzelle mit gezielt induzierten Defekten in der Zinkoxid (ZnO) Bottom-Elektrode und MoO_x Top-Elektrode vor und nach der Alterung mit Metallhalogenid Lampen zur Simulation des Sonnenspektrums. Beide Typen an Defekten sind klar im EL-Bild erkennbar, wobei nur für Defekte in der ZnO-Schicht ein erkennbarer Einfluss auf die Alterung erkennbar ist.

2.2 Photolumineszenz zur Optimierung der Tintenformulierung

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. Insbesondere für die erfolgreiche Implementierung einer Fassade mit semitransparenten Solarzellen in TP4 ist eine Gewährleistung der Stabilität von höchster Bedeutung. Aus diesen Gründen wurden Methoden entwickelt, um mit Hilfe des innerhalb des EnCN erworbenen know-hows die Tintenformulierung insbesondere im Blick auf Stabilität zu optimieren. Für die Komposition von Tintenformulierungen für organische Solarzellen stehen verschiedenste Komponenten an organischen Halbleitern sowie diverse Additive zur Verfügung, die in unzähligen Verhältnissen gemischt werden können. Eine effektive Optimierung, bei der ganze Bauteile hergestellt werden, ist damit vom experimentellen Umfang her nicht möglich. Im Gegensatz dazu bietet die Herstellung von dünnen Filmen in einer neu entwickelten Dropcasting-Methode mit durch Epoxidharz definierten Rähmchen die Möglichkeit, bis zu 1000 Filme unterschiedlicher Zusammensetzung an einem Tag herzustellen (Abbildung 7). Mit Hilfe von Absorptionsmessungen an den frischen Filmen im Vergleich zur Messung nach einer Alterung für 18 Stunden unter Metallhalogenidlampen können bereits erste Aussagen über die Lichtstabilität der Halbleiterfilme getroffen werden. Neben der Anwendung kombinatorischer Methoden, um eine Mischung aus vier Halbleitern zu optimieren, wurden insbesondere auch Algorithmen des maschinellen Lernens angewendet, um effektiv Kompositionen mit optimierter Stabilität zu finden. Dadurch ist eine erhebliche Reduzierung des experimentellen Aufwands sowie der Menge an benötigtem Material im Vergleich zu konventionellen Methoden erreicht worden. Jedoch sind mit den eingesetzten Absorptionsmessungen kaum Aussagen zu den erwarteten Bauteileigenschaften über die Photostabilität hinaus möglich.

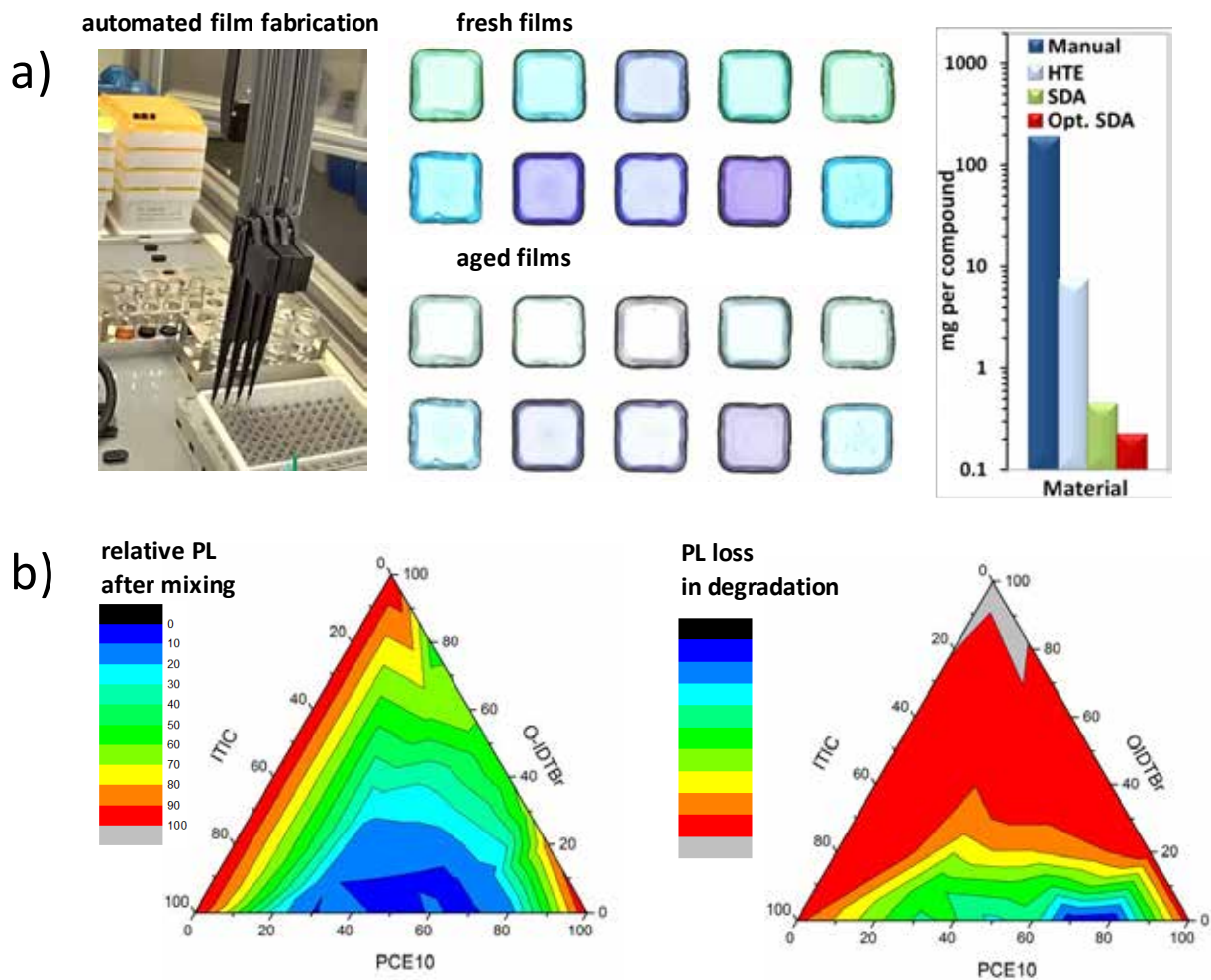


Abbildung 7: a) Hochdurchsatz-Filmherstellung zur Optimierung von Tintenformulierungen. b) Photolumineszenzdaten einer Dreikomponenten-Mischung aus dem Polymer PCE10 mit den Akzeptoren o-IDTBr und ITIC zeigen anhand der relativen PL-Intensität die Fähigkeit einer Mischung zur Generation freier Ladungsträger (links), und erlauben anhand des relativen PL-Verlustes Aussagen über die chemische Stabilität.

Durch die Anwendung berührungsloser Photolumineszenz-Methoden, die im EnCN entwickelt wurden, auf die im Hochdurchsatzverfahren hergestellten Filmbibliotheken, können wertvolle Informationen über die Filmeigenschaften gewonnen werden. Dadurch eröffnen sich weitreichende Möglichkeiten zur Optimierung komplexer Mehrkomponenten-Tintenformulierungen mit für das finale Bauteil optimierten Eigenschaften. Zum Beispiel kann die relative Photolumineszenz der Mischung verglichen zur Photolumineszenz der Einzelkomponenten 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.

2.3 Ausschöpfung der Fördermittel

Die Personalmittel wurden völlig ausgeschöpft, in 2019 nicht verausgabte Sach- und Investitionsmittel werden Anfang 2020 zur Erweiterung des Setups für Photolumineszenzmessungen an Filmbibliotheken benötigt.

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 tagsüber 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. Dazu wurden nanokristalline Tinten entwickelt, mit denen die im Folgenden beschriebenen elektrochromen Bauteile hergestellt worden sind.

3.2.1 Elektrochrome Bauteile für den infraroten Spektralbereich

Die elektrochromen Bauteile oder schaltbaren Fenster bestehen aus zwei Glas-Substraten, die parallel zueinander angeordnet sind und deren Innenseite als Elektroden ausgeführt worden sind (Abbildung 8a). Die Elektroden schließen einen Elektrolyten ein, der in unserem Fall Lithium Ionen enthält. Elektrochrome Bauteile, die im infraroten Bereich arbeiten sind für sichtbares Licht komplett transparent. Der infrarote Lichtanteil wird je nach Schaltzustand transmittiert oder auch absorbiert. Die elektrischen Felder werden in unseren Bauteilen über zwei Elektroden angelegt, wobei zumindest eine davon den gewünschten elektrochromen Effekt zeigen soll. Um elektrochrome Effekte im infraroten Bereich zu erzielen, wurden von uns Indium-Zinn-Oxid Nanokristalle synthetisiert, die als Film auf eine kompakte transparente Kontaktschicht aufgebracht werden. Dabei soll ein homogener, leitfähiger Film erzielt werden, der auch eine gewisse Porosität aufweist, um die elektrochromen Effekte zu optimieren. Während wir im ersten Projektjahr Schwierigkeiten hatten, entsprechende Filme aus der Lösung herzustellen, haben wir jetzt dieses Problem zu unserer Zufriedenheit gelöst. Schlüssel zu den gewünschten Filmen aus Indium-Zinn-Oxid 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 zeigen nach der Behandlung mit dem Querverbinder eine nanokristalline Oberflächenstruktur (Abbildung 8b) 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 8c eine Resonanz bei ~ 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.

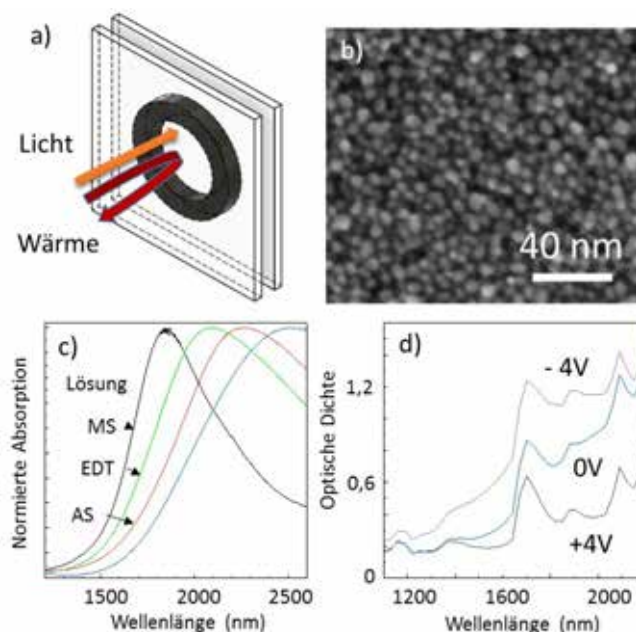


Abbildung 8: Elektrochromes Bauteil das im infraroten Spektralbereich arbeitet. a) Schematischer Aufbau des Bauteils. b) elektronenmikroskopische Aufnahme der nanokristallinen Oberfläche nach der Behandlung mit einem Querverbinder. c) optische Eigenschaften der Indium-Zinn-Oxid Nanokristall Lösung und 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.

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, also auf den dreifachen Wert.

3.2.2 Elektrochrome Bauteile für den sichtbaren Spektralbereich

Bei der Entwicklung dieser infrarot-elektrochromen Bauteile wurde deutlich, dass eine großskalige kommerzielle Anwendung als schaltbares Fenster vermutlich aus Kostengründen nicht in Frage kommen wird. Ein Problem sind dabei die transparenten Kontaktschichten aus Indium-Zinn-Oxid. Während solche Schichten relativ kostengünstig sind, wenn dafür Parameter verwendet werden wie sie in vielen Dünnschicht-Solarzellen geläufig sind, erfordert eine hohe Transparenz im Infraroten besonders hochohmige oder dünne Schichten. Solche Kontaktschichten sind kommerziell zwar auch erhältlich, allerdings zu wesentlich höheren Preisen, was eine Aufskalierung von elektrochromen Fenstern für das Infrarote momentan unwirtschaftlich erscheinen lässt. Anders verhält es sich in Bezug auf elektrochrome Fenster, die im sichtbaren Spektralbereich arbeiten. Für diesen Bereich gibt es eine Vielzahl von elektrochromen Materialien, die eingesetzt werden können. Aktuelle Untersuchungen wurden mit Preußisch Blau durchgeführt, welches in Form von nanokristallinen Dispersionen hergestellt werden kann. Dazu wurde von uns eine neue Synthese entwickelt, die eine stabile kolloidale Lösung aus Preußisch Blau-Nanopartikeln in Wasser ergibt (Abbildung 9a,b). Die Konzentration der Nanokristalle ist dabei ausreichend, um durch einfaches Aufschleudern homogene Schichten aus Preußisch Blau herstellen zu können, welche blau gefärbt sind und nach dem Trocknen ihre Wasserlöslichkeit verlieren. In einer elektrochemischen Halbzelle zeigen diese Schichten beim Anlegen einer Spannung die gewünschten reversiblen Farbumschläge von Blau auf Transparent. Die benötigte Spannung hängt dabei auch von der Gegenelektrode ab, die aus Ceriumoxid-Nanokristallen hergestellt worden ist. Die Ceriumoxid-Nanokristalle, die nach einem Standardverfahren synthetisiert worden sind, erscheinen in Lösung rötlich (Abbildung 9c), was den Elektroden eine leichte Absorption verleiht (Abbildung 9d). Eine entsprechende Leitfähigkeit in den nanokristallinen Elektroden wird dabei wiederum über eine Behandlung mit einem Querverbinder erreicht, so wie bei den oben beschriebenen Indium-Zinn-Oxid Nanokristallen. Die elektrochromen Bauteile bestehen aus den Preußen Blau- und Ceriumoxid-Elektroden, die über einen

Polymerelektrolyten miteinander verbunden sind (Abbildung 9e,f). Diese Bauelemente zeigen ebenfalls die gewünschten reversiblen Farbumschläge von Blau auf Transparent. Die Ceriumoxid-Nanokristall Elektroden tragen dabei wesentlich zur Stabilität der Elektroden bei. Zyklische Voltammetrie zeigt einen Oxidationspeak bei 0.7 V, bei dem das Preußisch Blau mit Lithium-Ionen interkaliert wird und sich dabei blau färbt, wogegen der Reduktionspeak bei -2.5 V zum Bleichen führt. Ohne das Ceriumoxid liegt der Oxidationspeak bei einer wesentlich höheren Spannung und verändert sich auch bei jedem Strom-Spannungs-Zyklus, was auf eine erhebliche Instabilität der elektrochemischen Zelle hinweist.

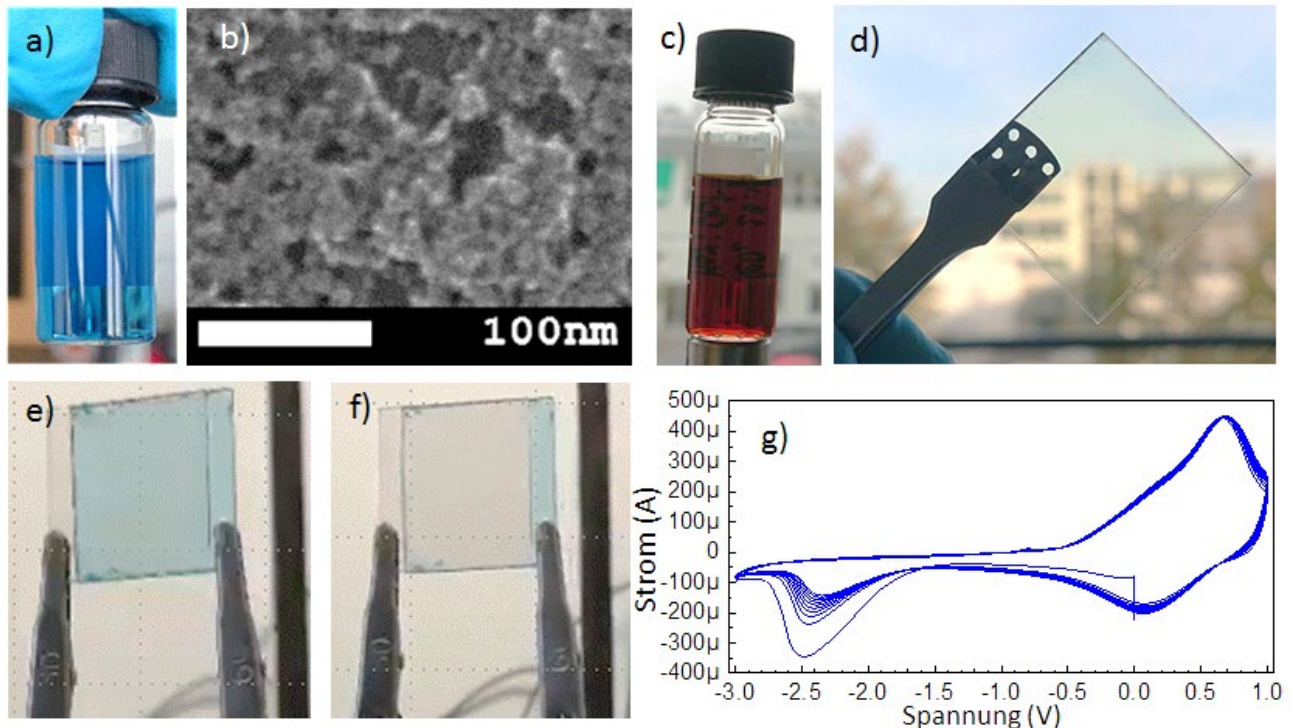


Abbildung 9: Elektrochrome Bauteile für den sichtbaren Spektralbereich. a) Stabile Preußisch Blau-Dispersion, die im Elektronenmikroskop b) als nanokristallines Material erscheint. c) Dispersion aus Ceriumoxid-Nanokristallen, welche in Form einer dünnen Schicht als transparente Gegenelektrode eingesetzt werden d). e) und f) Elektrochromes Bauteil aus Preußisch Blau-Nanokristallen im gefärbten und transparenten Schaltzustand. g) Zyklisches Voltammogramm des elektrochromen Fensters mit typischen Oxidations- und Reduktionspeaks für Preußisch Blau und Preußisch Weiß.

3.3 Ausschöpfung der Fördermittel

Mit den Restmitteln des Jahres 2019 planen wir einen weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiter am Projekt zu beschäftigen, der sich vor allem um die Prozessierung und die Stabilität der elektrochromen Bauteile kümmert.

3.4 Ausblick

Die oben beschriebenen Technologien für schaltbare Gläser werden im kommenden Projektjahr im Rahmen einer gemeinsam mit dem Projektpartner ZAE Bayern betreuten Masterarbeit auf kommerziell relevante Größen aufskaliert.

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

Gemäß dem in Tabelle 2 gezeigten Arbeits- und Zeitplan des Teilprojektes „Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld“ (TP4) wurden im Jahr 2019 alle drei Arbeitspakete wie im Folgenden beschrieben bearbeitet.

Tabelle 2: Schematische Darstellung des Arbeitsplans (TP4), jeder Abschnitt der Tabelle bezeichnet ein Halbjahr. Die schattierten Zellen bezeichnen die geplante Dauer der APs, die Meilensteine sind als M und die Übergabepunkte als Ü bezeichnet.

	2017		2018		2019		2020		2021	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
AP 1 Module		M1M		Ü1M		M2M Ü2M	M3M			
AP 2 Integration					M1I		M2I			M3I
AP 3 Lebensdauer				M1L	M2L					M3L

4.2.1 Aufskalierung von Perowskit-Solarzellen für die Fertigung im industriellen Maßstab

Die Perowskit-Photovoltaik hat in den letzten Jahren einen beispiellosen Höhenflug der Solarzell-Effizienzen auf bis zu momentan 25,2% erlebt. Damit ist diese Technologie auf Augenhöhe mit der Si-PV. Allerdings ist bei Perowskit-basierter Photovoltaik die für die industrielle Fertigung wichtige Reproduzierbarkeit der Effizienzen aufgrund der komplexen Kristallisationskinetik der aktiven Schicht deutlich schwerer zu erreichen als bei organischer Photovoltaik (OPV). Durch die Wahl geeigneter Materialien für die beiden Ladungsextraktionsschichten und die Optimierung der Abscheidung der Perowskitschicht gelang es, Solarzellen mit Effizienzen von bis zu 16% und einer sehr geringen Streuung der Effizienz-Werte herzustellen (Abbildung 10).

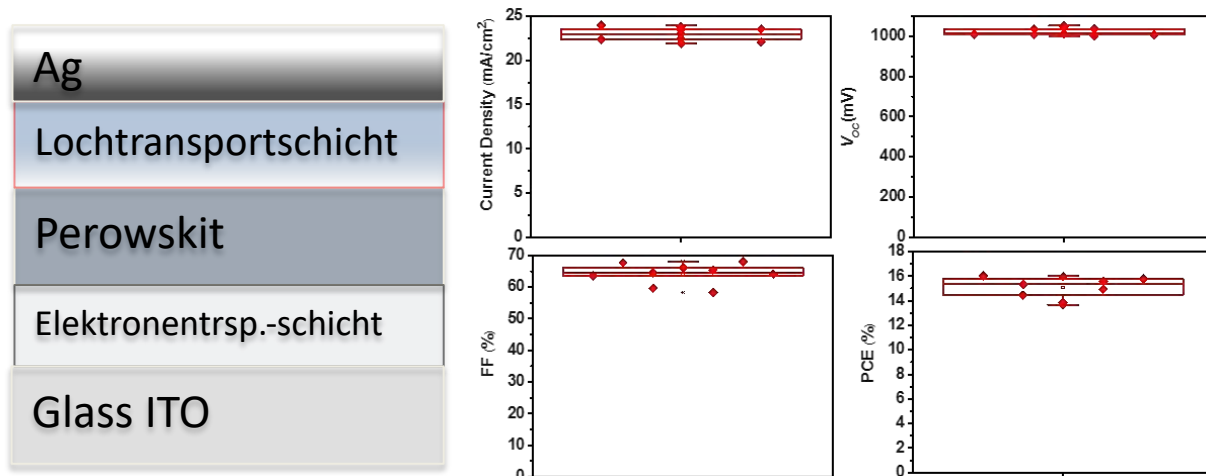


Abbildung 10: Nach dem Vakuumverfahren hergestellte Perowskit-Solarzellen. Links: Architektur. Rechts: Photovoltaische Kenngrößen (Kurzschlussstromdichte, Leerlaufspannung, Füllfaktor, Effizienz) einer Serie von Solarzellen. Beachtenswert ist die geringe Streuung der Werte.

Die Auswahl der Materialien für die Ladungsextraktionsschichten, ein Fulleren-Derivat für die Anode und das aus der OPV bekannte P3HT für die Kathode, berücksichtigt zudem die Notwendigkeit zur Kostenreduktion gegenüber den für die hocheffizienten Laborzellen verwendeten, teilweise sehr teuren Substanzen. Die Abscheidung des Nassfilms wurde von Spincoating auf die Rolle-zu-Rolle (R2R)-kompatible Methode des Rakelns umgestellt. Zur Trocknung des Nassfilms kam das neuartige Vakuumverfahren erfolgreich zum Einsatz, da es eine schnelle Entfernung des Lösungsmittels ermöglicht. Eine möglichst schnelle Trocknung ist entscheidend, um im Trockenfilm eine vollständige Belegung der Oberfläche mit großen Kristallen zu erhalten (Abbildung 11). Somit wurden 2019 die Voraussetzungen geschaffen, um im nächsten Schritt reproduzierbare R2R-Verfahren zur Herstellung hocheffizienter und preisgünstiger Perowskit-Module zu entwickeln.

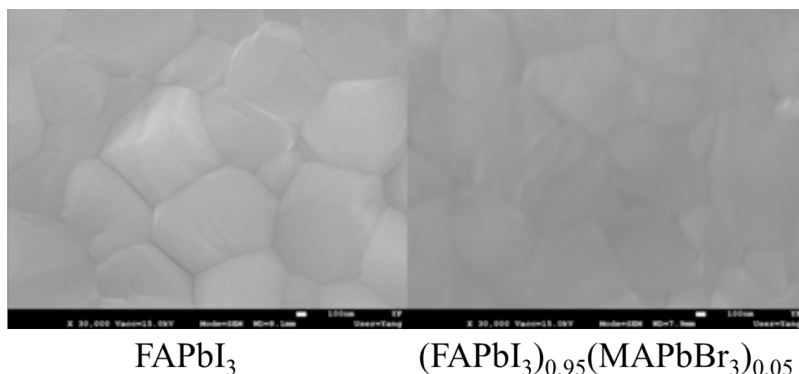


Abbildung 11: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Perowskit-Filmen unterschiedlicher Zusammensetzung (FA – Formamidinium, MA – Methylammonium), hergestellt nach dem Vakuumverfahren.

4.2.2 Fassadenintegration organischer PV-Module

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojekts „Fassade³“ wurden die ersten organischen Photovoltaik (OPV)-Module für die Integration in die modularen und multifunktionalen Fassadenelemente zur energetischen Sanierung des Demonstrationsgebäudes im Innopark Kitzingen fertiggestellt (Abbildung 12 links). Die eingesetzten Module basieren auf verschiedenen Technologien, die in den letzten Jahren am ZAE Bayern für die Gebäudeintegration entwickelt wurden. Die Elektroden der Module bestehen aus Indium-Zinn-Oxid bzw. Silbernanodrähten, so dass sich keine störenden Leiterbahnen im aktiven Bereich der Module befinden. Die Verschaltungszonen, die die einzelnen Zellen zum Modul verbinden, sind dank der Strukturierung mittels Laserablation nur wenige Hundert Mikrometer breit, so dass auch diese schon aus geringer Entfernung nicht mehr sichtbar sind. Die nahezu beliebig einstellbare Dicke der photoelektrisch aktiven Schicht ermöglicht die gezielte Variation der Transparenz der Module. Schließlich lassen sich die Module ohne zusätzlichen Aufwand in beliebiger Länge fertigen. Dieses Portfolio an Eigenschaften eröffnete den am Projekt beteiligten Architekten der Technischen Hochschule Nürnberg (THN) eine hohe Gestaltungsfreiheit für die Integration ästhetisch ansprechender PV-Elemente in die Fassade. Es wurde entschieden, die OPV-Module als Glasvordächer zu realisieren, so dass sie gleichzeitig als Beschattungselemente dienen (Abbildung 12 rechts). Durch systematische Variation der Laminationsbedingungen gelang es, die OPV-Module ohne Effizienzverluste in die Glasdächer einzubringen.

Im Rahmen eines Wettbewerbs unter Architekturstudenten an der THN entstanden unter der Anleitung von Prof. R. Krippner weitere Vorschläge für Solarfassaden, die sich unter Ausnutzung der einzigartigen Eigenschaften organischer PV realisieren lassen (Abbildung 13).

Parallel zur Fertigung der OPV-Module wurden in enger Kooperation mit den Arbeitsgruppen von Prof. Dentel und Prof. Kießling am EnCN die Strategie für das energetische Monitoring der modularen multifunktionalen Fassadenelemente entwickelt (Abbildung 14) bzw. die für dieses Monitoring notwendige Elektronik entworfen und gebaut.



Abbildung 12: Links: Glasvordach mit einlamierten semitransparenten OPV-Modulen. Rechts: Computervisualisierung der Ansicht der Fassade des Demonstrationsgebäudes im Innopark Kitzingen mit den modularen multifunktionalen Fassadenelementen, incl. OPV-Glasvordächern.



Abbildung 13: Ausgewählte Entwürfe von Solarfassaden auf Basis der OPV-Technologie. Fotos: R. Krippner

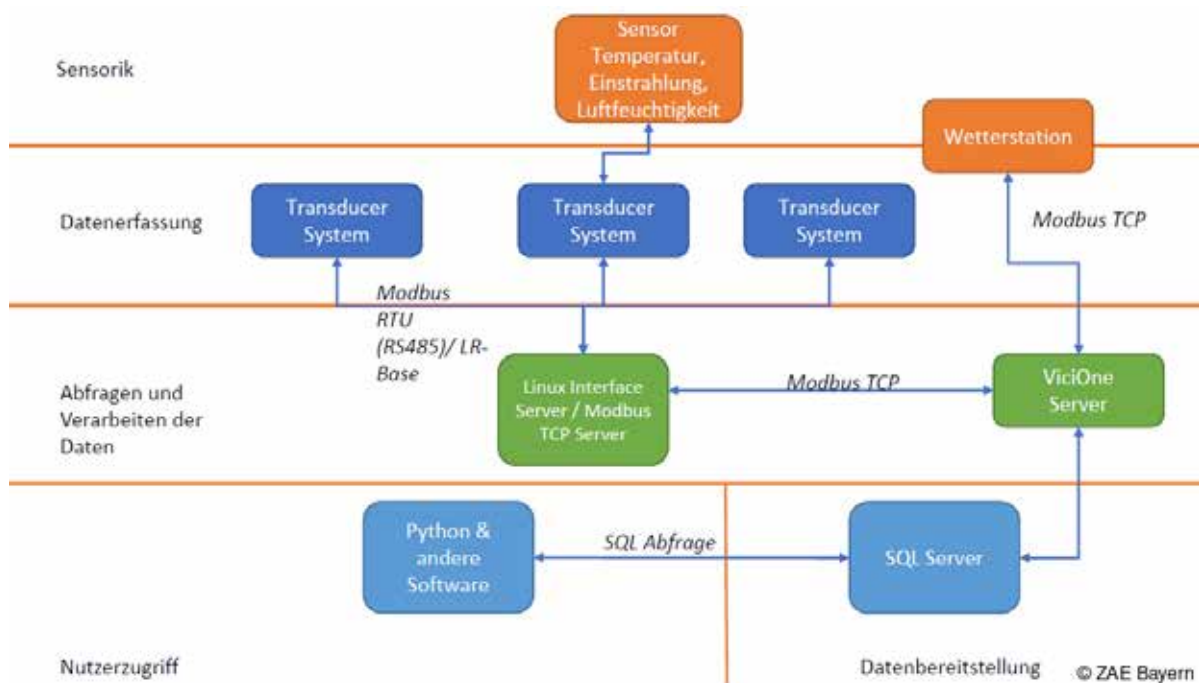


Abbildung 14: Flussschema für die Datenerfassung im Demonstrationsgebäude

4.2.3 PVB/Glasflocken-Kompositfolien für die Verkapselung gedruckter Opto-Elektronik

Die Solarfabrik der Zukunft des ZAE Bayern beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung lösungsbasierter Verkapselungsmethoden für gedruckte opto-elektronische Bauelemente. Diese Verkapselungsmethoden erlauben die direkte Aufbringung von Wasserdampf- und Sauerstoffbarrieren auf beliebige Bauelemente bereits während der Produktion, was mit einer erheblichen Kostenersparnis verbunden ist. Anforderungen an die Barrierschichten beinhalten neben guten Barriereigenschaften v.a. geringe Kosten der Ausgangsmaterialien, hohe Flexibilität, hohe Transparenz und leichte Prozessierbarkeit. Diese Anforderungen erfüllen Polymer/Glasflockenkomposite in nahezu perfekter Weise. Die Einbringung von Glasflocken mit einem Aspektverhältnis von ca. 2000 in die Polymermatrix aus Polyvinylbutyral (PVB) erfolgt durch Einrühren der Glasflocken in eine Lösung des Polymers, Aufstreichen auf die zu schützende Oberfläche und anschließende Trocknung des Films. Die resultierenden Barrierschichten (Abbildung 15 links) weisen Wasserdampftransmissionsraten (WVTR) von ca. $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ und Sauerstofftransmissionsraten (OTR) von ca. $10^{-1} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ auf. Die Schutzwirkung der PVB/Glasflocken-Kompositfolien wurde in beschleunigten Alterungstests von P3HT:PCBM-basierten Solarzellen ermittelt. Nach 160 Stunden in feuchter Hitze (40 °C/85 % rel. F.) zeigen die in Kompositfolien verkapselten Solarzellen keinerlei Abnahme der Effizienz, während in reines PVB verpackte Zellen innerhalb von 24 Stunden vollständig degradiert sind (Abbildung 15 Mitte). Nach 20.000 Biegezyklen ist keine Änderung der Barriereigenschaften feststellbar (Abbildung 15 rechts). Die beschriebene Direktverkapselungsmethode ermöglicht somit die in-line-Verkapselung elektronischer Bauteile durch drucktechnische Verfahren, sowohl von 2D Bauelementen, aber v.a. von den in Abschnitt 1.2.2 beschriebenen funktionalisierten 3D Objekten, deren Verkapselung durch Auflamination von Folien nur sehr begrenzt möglich ist.

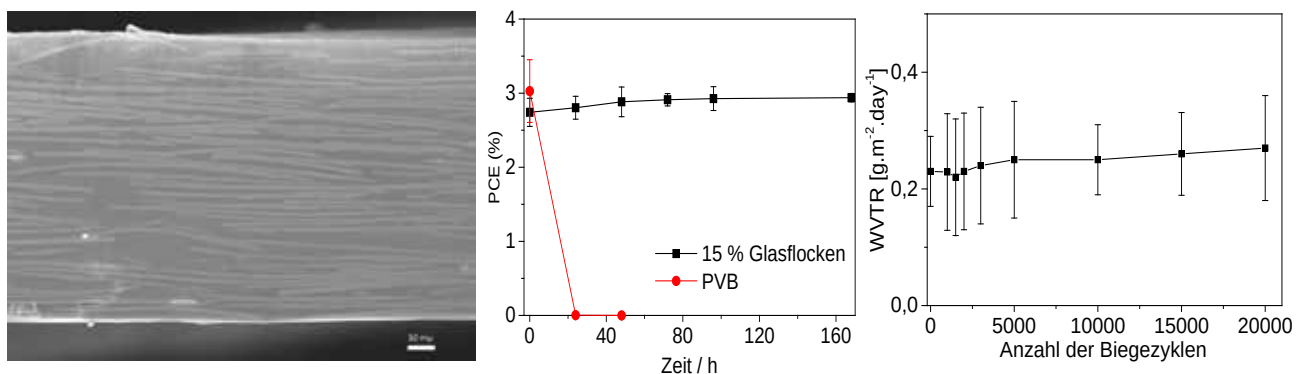


Abbildung 15: Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines PVB-Films mit Glasflocken des Aspektverhältnisses 1:2000. Mitte: zeitliche Veränderung der Effizienz organischer Solarzellen (P3HT:PCBM) bei 40 °C und 85 % rel. Feuchte, bei Verpackung in PVB-Folie (rote Punkte) und in die Glasflocken/PVB-Kompositfolie (schwarze Quadrate). Rechts: Wasserdampftransmissionsrate der Glasflocken/PVB-Kompositfolie als Funktion der Anzahl der Biegezyklen (Biegeradius 3 cm).

4.3 Kooperationen

Die Aufskalierung der Perowskit-Solartechnologie in den industriellen Maßstab erfolgt in Kooperation mit der Fa. Armor SAS und deren bayerischer Niederlassung, der OPVIUS GmbH.

Gemeinsam mit Prof. Dentel, Prof. Kießling und Prof. Krippner von der THN wird das BMWi-Projekt „Fassade³“ zur Errichtung einer multifunktionalen Demonstrationsfassade durchgeführt. Weitere Partner in diesem Projekt sind Bavarian Optics, OPVIUS GmbH, die Hohenstein Institute für Textilforschung und ACX GmbH.

Gemeinsam mit dem Teilprojekt 2 werden bildgebende Methoden zur Charakterisierung von Defekten und deren Auswirkung auf das Degradationsverhalten der Module entwickelt.

Hinsichtlich der Herstellung der flüssigprozessierten Barrieren besteht eine enge Kooperation mit dem TAZ Spiegelau (FH Deggendorf), das u.a. die Glasflocken zur Verfügung stellt.

4.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Die Personal- und Sachmittel wurden vollständig ausgeschöpft. In 2019 nicht verausgabte Investitionsmittel werden in 2020 v.a. für die Aufskalierung der Perowskit-Technologie und die Integration gedruckter Solarmodule in Demonstrationsobjekte benötigt.

4.5 Ausblick

Im Jahr 2020 wird, auf der Grundlage der bisher erarbeiteten Techniken zur reproduzierbaren Herstellung vollständig lösungsprozessierter effizienter Perowskit-Solarzellen, die Aufskalierung dieser Technologie im Hinblick auf die Rolle-zu-Rolle-Fertigung großflächiger PV-Module im Fokus stehen.

Im Rahmen des BMWi-Projekts Fassade³ werden die oben vorgestellten Solarmodule zusammen mit der entwickelten Schaltungstechnik in modulare und multifunktionale Fassadenelemente integriert, zunächst in ein „Mockup“, um eventuelle Schwachstellen zu identifizieren, und anschließend in die Fassade des Demonstrationsgebäudes. Dort wird die Energiebilanz der Fassade mit Hilfe der im Hause entwickelten Elektronik ermittelt.

Die gedruckten Barrieren werden hinsichtlich ihrer Wasserdampf- und Sauerstoff-Durchlässigkeiten weiter optimiert. Angestrebt sind Lebensdauern der verkapselten Solarmodule von mehreren Tausend Stunden in beschleunigten Alterungstests. Weiterhin im Fokus stehen die Direktbeschichtung der Bauteile mit Verkapselungsmaterialien sowie die Erhöhung der Flexibilität, was v.a. für die Integration gedruckter Opto-Elektronik in Textilien von Bedeutung ist.

5 Schlussworte

Die Teilprojekte des Projekts EET haben ihre für 2019 vorgesehenen Ziele, Technologien für die Reduktion der CO₂-Emissionen zu entwickeln und zur Anwendungsreife zu skalieren, weitestgehend erreicht. Als besonderer Glanzpunkt ist die Entwicklung der Weltrekord OPV-Module im Teilprojekt 1 zu nennen, die die Effizienzen organischer Solarmodule in den Bereich anderer Dünnschicht-Technologien gebracht und damit der Kommerzialisierung dieser Technologie enormen Auftrieb gegeben haben. Das im AiF-Projekt „OLE3D“ im Rahmen des Teilprojekts 1 gemeinsam mit der FAU und der Neotech GmbH entwickelte 3D Druckverfahren zur Funktionalisierung von 3D Oberflächen weist den Weg zu neuen Anwendungen der gedruckten Opto-Elektronik. Die im Teilprojekt 3 vorgestellten schaltbaren Gläser schaffen die Voraussetzung für die Kontrolle des solaren Wärmeeintrags in Gebäude und besitzen damit ein hohes Potential für die Verbesserung der Effizienz von Neubauten und Bestandsgebäuden. Das Potential der OPV hinsichtlich Gebäudeintegration demonstrieren die im Teilprojekt 4 hergestellten, ästhetisch ansprechenden Solar-Glasvordächer für die Integration in die modularen multifunktionalen Fassadenelemente im gemeinsam mit der OPVIUS GmbH und den am EnCN vertretenen Arbeitsgruppen der THN durchgeführten Projekt Fassade³. Die in Teilprojekt 2 entwickelten Techniken für die in-line Qualitätskontrolle ermöglichen eine Hochdurchsatz-Produktion der Solarmodule mit hoher Ausbeute. Im Teilprojekt 2 wurden außerdem Verfahren zur Charakterisierung von Defekten und deren Auswirkung auf die Lebensdauer der Solarmodule entwickelt. Die in Teilprojekt 4 in Kooperation mit dem Industriepartner Armor/OPVIUS entwickelten robusten Verfahren zur reproduzierbaren Herstellung von Perowskit-Solarzellen schaffen die Basis für die Aufskalierung dieser PV-Technologie für die Fertigung im industriellen Maßstab. Die ebenfalls in Teilprojekt 4 vorgestellten gedruckten Barrieren ermöglichen die Verlängerung der Lebensdauer opto-elektronischer Bauelemente durch kostengünstige in-line Verkapselung sogar auf ansonsten schwer zu schützenden 3D Oberflächen.

Im Jahr 2020 werden die begonnenen Arbeiten wie geplant fortgesetzt. Im Rahmen der Zusammenarbeiten zwischen den EET-Teilprojekten werden die entwickelten Technologien an den Partner ZAE zur Integration (Defekt-Erkennung und in-line Qualitätskontrolle) übergeben bzw. in einer gemeinsam betreuten Masterarbeit aufskaliert (schaltbare Fenster). Im Rahmen des Verbundprojekts „Fassade³“ werden die oben beschriebenen PV-Glasvordächer zunächst in ein „Mockup“ und anschließend in die Fassade des Demonstrationsgebäudes in Kitzingen eingebaut und mit Hilfe der entwickelten

Monitoring-Systeme gemeinsam mit dem Projektpartner THN evaluiert. Im Projekt „OLE3D“ werden mit Hilfe des gemeinsam mit der Neotech AMT GmbH entwickelten Robotik-Tintenstrahl-Systems 3D Objekte mit organischer Optoelektronik bedruckt und damit die Relevanz der entwickelten Druck- und Beschichtungs-Technologien über die gedruckte PV hinaus demonstriert.

6 Vorträge & Poster 2019

- [1] C. J. Brabec. AMANDA – a platform for automated and autonomous solar material & device innovation. Next-Gen.: IV PV Materials, International Conference, 2018
- [2] H.-J. Egelhaaf. Organic Solar Modules - Photovoltaics Light? Synergietreffen der DLR, Erlangen, 2019
- [3] H.-J. Egelhaaf. How to make OPV modules with a world record efficiency. 4th Next Generation Solar Energy Conference, Nürnberg, 2019
- [4] H.-J. Egelhaaf. Printed Optoelectronic Systems. Konferenz: Progress in Organic Optoelectronics & Energy Conversion, Malaga/Spanien, 2019
- [5] C. J. Brabec. Accelerating Material Innovation. Workshop, Rijksuniversiteit Groningen, 2019
- [6] C. J. Brabec. NFAs – a panacea for OPV? Internationale Winterschule Kirchberg, 2019
- [7] C. J. Brabec. Large Scale Facilities – a driving force for material innovation. Eröffnungsfeier SAXS/SANS Großgerät, 2019
- [8] I. A. Channa. Printed moisture and oxygen barriers for the protection of optoelectronics. Universität Bayreuth, 2019
- [9] S. Feroze. R2R Manufacturing of Organic and Perovskite Solar Modules. Conference Next-Gen: IV PV Materials, University of Groningen, 2019
- [10] H.-J. Egelhaaf. Gedruckte Photovoltaik und deren Anwendungsfelder. Kulturidee GmbH: Die Lange Nacht der Wissenschaften, 2019
- [11] H.-J. Egelhaaf. Gedruckte Photovoltaik für die Gebäudeintegration. IHK Workshop am EnCN, 2019
- [12] A. Distler, H.-J. Egelhaaf, M. Heyder, L. Wendt. OPV - Organische Photovoltaik. Kulturidee GmbH: Die Lange Nacht der Wissenschaften, 2019
- [13] F. Hoga. Solarzellen-Piano. Kulturidee GmbH: Die Lange Nacht der Wissenschaften, 2019
- [14] H.-J. Egelhaaf. R2R Manufacturing of Organic Solar Modules. South China University of Technology, 2019
- [15] H.-J. Egelhaaf. R2R Manufacturing of Organic Solar Modules. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne in Sion, 2019
- [16] H.-J. Egelhaaf. R2R Manufacturing of Organic Solar Modules. Madrid Institute for Advanced Studies (IMDEA), 2019
- [17] H.-J. Egelhaaf. Recent Advances in High Throughput Process Development. Accelerating Materials Seminar Helmholtz Institut, Erlangen, 2019
- [18] I. A. Channa. Printed moisture and oxygen barriers for the protection of optoelectronics. OLE-3D PBA Meeting, 2019
- [19] I. A. Channa. Printed moisture and oxygen barriers for the protection of optoelectronics. EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2019
- [20] S. Feroze. Roll to Roll manufacturing of Organic Photovoltaics and their applications within a Building Integrated PV System. EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2019
- [21] F. Hoga, M. Braun. Einsatz von OPV in der Fassadentechnik. EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2019
- [22] F. Yang. Upscaling of Perovskite Photovoltaics. EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2019
- [23] A. Distler. ZAE Bayern – Solar Factory of the Future. Workshop "Wallonia meets EnCN", 2019

7 Veröffentlichungen 2019

A – Impact Factor > 15, B – 15 > Impact Factor > 5, C – Impact Factor < 5

- [24] A: C. Zhang; T. Heumüller; S. Leon; W. Gruber; K. Burlafinger; X. Tang; J.D. Perea; I. Wabra; A. Hirsch; T. Unruh; N. Li; C. J. Brabec. A top-down strategy identifying molecular phase stabilizers to overcome microstructure instabilities in organic solar cells. *Energy and Environmental Science*, 12, 1078-1087, 2019
- [25] A: Y. Hou; C. Xie; V.V. Radmilovic; B. Puscher; M. Wu; T. Heumüller; A. Karl; N. Li; X. Tang; W. Meng; S. Chen; A. Osvet; D.M. Guldi; E. Spiecker; V.R. Radmilovic; C. J. Brabec. Assembling Mesoscale-Structured Organic Interfaces in Perovskite Photovoltaics. *Advanced Materials*, 31, Art.Nr.: 1806516, 2019
- [26] A: X. Du; T. Heumüller; W. Gruber; A. Classen; T. Unruh; N. Li; C. J. Brabec. Efficient Polymer Solar Cells Based on Non-fullerene Acceptors with Potential Device Lifetime Approaching 10 Years. *Joule*, 3, 215-226, 2019
- [27] A: A. Classen; T. Heumüller; I. Wabra; J. Gerner; Y. He; L. Einsiedler; N. Li; G. Matt; A. Osvet; X. Du; A. Hirsch; C. J. Brabec. Revealing Hidden UV Instabilities in Organic Solar Cells by Correlating Device and Material Stability. *Advanced Energy Materials*, 9, Art.Nr.: 1902124, 2019
- [28] C: J. Hepp; A. Vetter; S. Langner; M. Woiton; G. Jovicic; K. Burlafinger; J.A. Hauch; C. Camus; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Infrared absorption imaging of water ingress into the encapsulation of (opto-)electronic devices. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9 (1), 252 – 258, 2019
- [29] B: P. Kubis; J. Winter; A. Gavrilova; M. Hennel; S. Schlosser; I. Richter; A. Distler; M. Heyder; S. Kery; P. Lenk; S. Geiger; C.J. Brabec; H.P. Huber; H.-J. Egelhaaf. All sub-nanosecond laser monolithic interconnection of OPV modules. *Prog. Photovoltaics*, 27 (6), 479-490, 2019
- [30] B: A.A. Yousefi Amin; N. Killilea; M. Sytnyk; P. Maisch; K.C. Tam; H.-J. Egelhaaf; S. Langner; T. Stubhan; C.J. Brabec; T. Rejek; M. Halik; K. Poulsen; J. Niehaus; A. Koeck; W. Heiss. Fully Printed Infrared Photodetectors from PbS Nanocrystals with Perovskite Ligands. *ACS Nano*, 13 (2), 2389-2397, 2019
- [31] B: A. Karl; A. Osvet; A. Vetter; P. Maisch; N. Li; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Discriminating Bulk versus Interface Shunts in Organic Solar Cells by Advanced Imaging Techniques. *Prog. Photovoltaics*, 27 (5), 460-468, 2019
- [32] B: P. Maisch; L.M. Eisenhofer; K.C. Tam; A. Distler; M.M.Voigt; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. A generic surfactant-free approach to overcome wetting limitations and its application to improve inkjet-printed P3HT: non-fullerene acceptor PV. *Journal of Materials Chemistry A*, 7 (21), 13215-13224, 2019
- [33] B: A. Tournebize; D. Deribew; A. Gregori; R. C. Hiorns; A. Distler; H.-J. Egelhaaf; C. Lartigau-Dagron; A. Allal; A. Rivaton; H. Peisert; T. Chassé. Influence of material migration on the mechanical integrity of inverted organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 110008, 2019
- [34] A: I.A. Channa; A. Distler; M. Zaiser; C.J. Brabec; H.-J. Egelhaaf. Thin Film Encapsulation of Organic Solar Cells by Direct Deposition of Polysilazanes from Solution. *Advanced Energy Materials*, 9 (26), 1900598, 2019
- [35] C: H.-J. Egelhaaf; R. Krippner. Strom aus der Wand: Innovative Solar-Module. *Wirtschaft in Mittelfranken*, 10, 22-25, 2019
- [36] A: S. Langner et al., Beyond Ternary OPV: High-Throughput Experimentation and Self-Driving Laboratories Optimize Multi-Component Systems, *Advanced Materials*, 2019
- [37] Oleksandr Mashkov, Julien Körfer, Andreas Eigen, Amir-Abbas Yousefi-Amin, Niall Killilea, Anastasiia Barabash, Mykhailo Sytnyk, Neamul Khansur, Marcus Halik, Kyle Webber, Wolfgang Heiss. Effect of Ligand Treatment on the Tuning of Infrared-Plasmonic Indium-Tin-Oxide Nanocrystal Electrochromic Devices. *Advanced Engineering Materials* (2020), <https://doi.org/10.1002/adem.202000112>.

W2 Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

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

Projektbericht 2019

Die Stützprofessur beschäftigt sich mit der Synthese lösungsprozessierten Halbleitermaterialien als Ausgangsmaterial für die Entwicklung elektronischer Bauelemente. Die Materialien umfassen mehrere Halbeiterklassen, angefangen von den zurzeit modernen Perowskiten, über zweidimensionale Halbleiter die in atomaren Mono- oder Mehrlagen vorkommen, zu Quantenpunkten, und auch organischen Farbstoffen. Das Einsatzgebiet der daraus entstehenden Bauelemente reicht von Photo- und Röntgendetektion hin bis zur photokatalytischen Wasserspaltung. Einige der durchgeführten Arbeiten sind sehr Grundlagenorientiert, wie die Entwicklung verschiedener Wachstumsmoden von kristallinen Systeme aus unterschiedlichen Lösungen und deren praktischer Wert wird sich erst längerfristig herausstellen. Andere Themen, wie die Oberflächenbehandlung der Nanomaterialien durch Liganden, Querverbindern oder durch epitaktisches (atomar geordnetes) Wachstum sind unabhängig von den gewählten Materialien für alle Nanostrukturen von großer Wichtigkeit und die erarbeiteten Konzepte lassen sich teilweise von Material zu Material übertragen.

KONTAKT

Prof. Dr. Wolfgang Heiß

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
wolfgang.heiss@fau.de

Telefon
+49 911 56854-9216

1 Lösungsprozessierte Perowskite

Metall-Halid-Perowskite revolutionieren das Forschungsgebiet der lösungsprozessierten Halbleiter, aufgrund ihrer einfachen Herstellbarkeit, aber auch ihrer günstigen elektrischen und optischen Eigenschaften. Auf Perowskit basierende Halbleiter Solarzellen wurden in den letzten Jahren extrem rasch entwickelt und vor allem Solarzellen aus Perowskiten zeigen hervorragende Effizienz Werte. Diese Arbeiten auf dem Gebiet der Solarzellen haben auch ein allgemeineres Interesse an dieser Materialklasse geweckt, weshalb sich die Forschungsarbeiten der W2 Stützprofessur auch eingehend mit dieser Materialklasse befasst hat.



Abbildung 1: Chemisches Labor

1.1 Epitaktische Perowskite durch Tintenstrahldrucken

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 Metall-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 Metall-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 Perowskitwachstum an Luft haben wir noch zusätzlich herausgefunden, dass die Luftfeuchtigkeit eine ganz entscheidende Rolle spielt. Erstaunlicherweise wurde besseres Wachstum bei höheren Luftfeuchtigkeit gefunden, was der Unterdrückung ungewünschter Phasen des Perowskites zugeschrieben werden konnte. Durch Kontrolle der Abscheidebedingungen wurden zunächst geordnete Perowskitstrukturen gewachsen (Abbildung 2), 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 Perowskite-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.

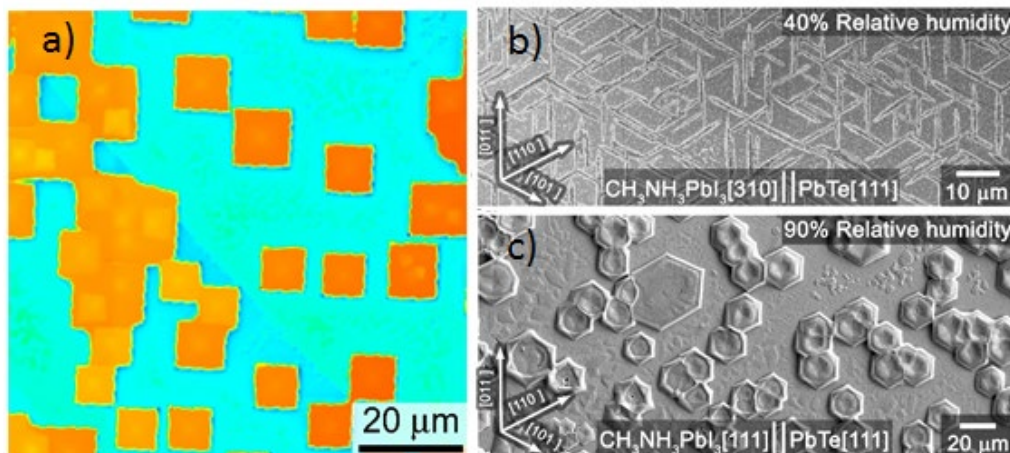


Abbildung 2: Epitaktische Perowskit-Strukturen verschiedener Orientierung. a) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ auf $[100]$ PbS . $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ auf $[111]$ orientiertem PbTe gewachsen bei normaler b) und c) erhöhter Luftfeuchtigkeit.

1.2 Perowskite für die Röntgendetektion

1.2.1 Bleifreie Perowskite für die Röntgen Direktkonversion

Neben Anwendungen in Solarzellen eignen sich Metall-Halid-Perowskite Halbleiter für eine Reihe weiterer Anwendungen. Unsere Gruppe hat erkannt, dass die üblichen bleihaltigen Perowskite, sich neben der Photovoltaik auch perfekt für die Entwicklung von Röntgendetektoren eignet. Unsere Gruppe hat 2015 das erste Papier über lösungsprozessierte Metall-Halid-Perowskite für die Röntgendetektion publiziert. Diese Detektoren profitieren dabei nicht nur von den günstigen elektrischen Eigenschaften der Perowskite, sondern auch von deren günstigen Röntgenabsorption, die auf atomare Zusammensetzung der Perowskite zurück zu führen ist. Für praktische Anwendung der Perowskite als Detektoren hatten wir 2017 zu einer Arbeit beigetragen, in der gesinterte Wafer aus Perowskiten vorgestellt worden sind, als skalierbare Substrate für die Herstellung der Röntgendetektoren. Dabei ist ein wesentliches Problem der Metall-Halid-Detektoren geblieben – deren Toxizität die auf das enthaltene Blei zurück zu führen ist. Deshalb haben wir uns in diesem Projektjahr auf die Entwicklung bleifreier Metall-Halid-Perowskite konzentriert. In der Literatur gibt es mittlerweile eine große Anzahl von Publikationen auf diesem Gebiet, wobei neben verschiedenen Zusammensetzungen auch verschiedene Formen der Perowskite untersucht worden sind, immer neue Rekordwerte für die Sensitivität dieser Bauteile berichtet werden. Deshalb haben wir einige vielversprechende bleifreie Perowskit-Zusammensetzungen gewählt, um deren Eignung für die Röntgendetektion unter vergleichbaren Bedingungen zu testen. Dazu wurden aus allen Komponenten zunächst aus der Lösung Pulver hergestellt, welche in einem zweiten Schritt zu Wafern gepresst worden sind (Abbildung 3). Die Proben wurden mit und ohne anschließendem Temperschnitt charakterisiert und die Röntgensensitivität als auch die Detektionslimits der Detektoren gemessen. Das Tempern der Proben sollte dabei zu einer Passivierung der Oberflächen und Grenzflächen führen. Die Messungen wurden über die Firma SIEMENS Healthineers unter identischen Bedingungen durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse sind größten Teils im Widerspruch zu publizierten Werten – die unter vergleichbaren Bedingungen erzielten Werte für die Sensitivitäten sind im allgemeinen deutlich geringer als die publizierten und die Detektionslimits sind deutlich schlechter. Unser Vergleich ergibt auch, dass ein Bi-Iodid bessere Werte ergibt als sämtliche getesteten bleifreien Perowskite. Für mögliche industrielle Weiterentwicklungen dieser Detektoren bedeutet dies, dass die in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlichten Ergebnisse auf jeden Fall in eigenen Messlabors überprüft werden müssen, und dass vermutlich nur bleihaltige Metall-Halid-Perowskite wirklich gute Ergebnisse als Röntgendetektoren liefern.

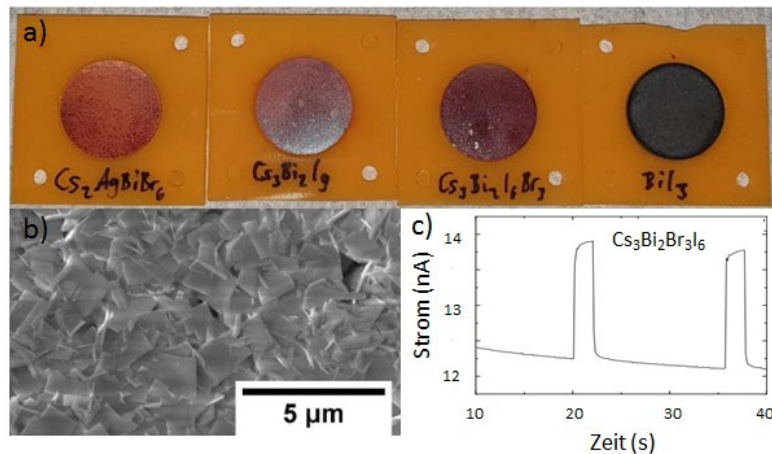


Abbildung 3: a) Presslinge aus verschiedenen bleifreien Perowskiten. b) An der Oberfläche der Perowskit Presslinge bilden sich nach dem Tempern Mikrokristalle, die zur Passivierung der Proben dienen sollen. c) Signal unter Beleuchtung mit Röntgenstrahl-Pulsen.

1.2.2 Energieauflösende Szintillatoren aus Perowskit Schichtsystemen

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 heuer in Zusammenarbeit mit Siemens Healthineers einen mehrfarbigen Röntgenszintillator vorgeschlagen (Abbildung 4), 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 einfachen Rechnungen und Materialvorschläge. Eine Umsetzung der Vorschläge würde allerdings noch ein weiterführendes Forschungsprojekt benötigen.

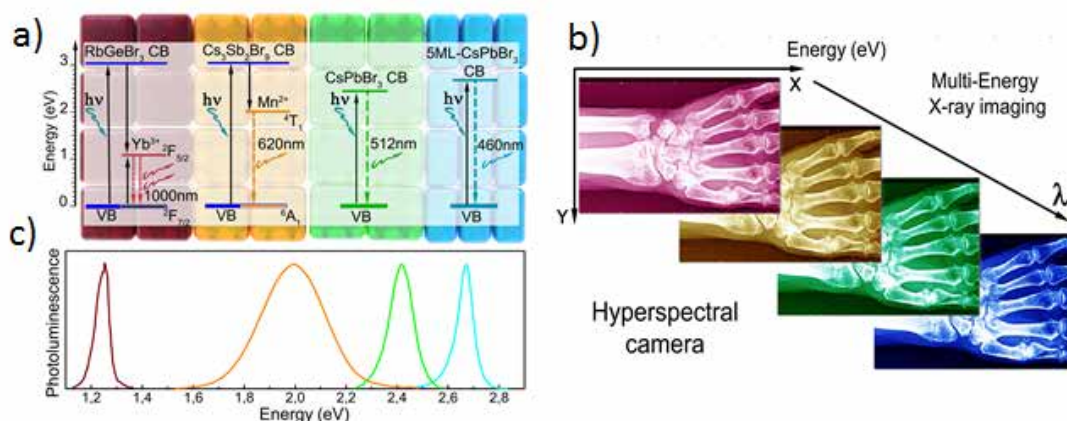


Abbildung 4: Vorschlag für einen Mehrfarben-Röntgen-Szintillator aus Perowskit-Nanokristallen. Röntgenstrahlung mit unterschiedlichen Energien führen zur Emission mit unterschiedlicher Farbe. a) vorgeschlagene Schichtfolge der (dotierten) Perowskit-

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.

Abschließend ist zu unseren Arbeiten an den Perowskiten für die Röntgendetektion zu bemerken, dass diese nicht nur in Zusammenarbeit mit den SIEMENS Healthineers geführt hat, sondern dass von uns auch eine Auftragsarbeit zu einem sehr verwandten Thema für diese Firma durchgeführt worden ist.

2 Zweidimensionale Halbleiter aus der Lösung

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, zur Exfoliation als auch zur direkten Synthese. Wir haben uns in diesem Projektjahr mit zwei unterschiedlichen zweidimensionalen Halbleitern beschäftigt, mit potentiellen Anwendungen als photoleitfähige oder auch nur elektrisch leitfähige Komponenten in gedruckten Solarzellen oder anderen elektronischen Bauteilen.

Als Kandidat für ein leitfähiges Material wurde von uns Bi_2Se_3 durch eine direkte Synthese hergestellt. Bi_2Se_3 ist in Zusammenhang mit der Entwicklung von topologischen Isolatoren (Nobelpreis 2016) von großem Interesse als auch als thermoelektrische Bauelemente. Die nasschemische Synthese liefert eine kolloidale Lösung mit Scheibenförmigen Hexagonen. Die hexagonalen Scheibchen sind im Optimalfall 5 Atomlagen dick und haben eine laterale Ausdehnung im Mikrometerbereich. Wie auch andere kolloidale Nanomaterialien, erfordert die Stabilisierung in der Lösung einen organischen Liganden, der in einem Film aus diesem Material isolierend wirkt. Erst nach der Entfernung dieser organischen Komponenten kann in den Filmen eine Leitfähigkeit gemessen werden. Während in der Literatur die Liganden üblicherweise bei Temperaturen größer 200°C verbrannt werden, haben wir eine Methode entwickelt diese Liganden in einer Lösung zu entfernen. So ergeben die Bi_2Se_3 Schichten nach dem Trocknen ohne jede weitere Behandlung relativ gute elektrische Leitfähigkeiten und auch hohe Mobilität. Verbessert wurde die Leitfähigkeit noch durch eine Dotierung des Materials, welche auch in Lösung durchgeführt worden ist. Damit entsteht dann eine Tinte, die für das Drucken von Kontaktschichten herangezogen werden kann. Derzeit wird für diesen Zweck vor allem Silber verwendet, das einerseits relativ teuer und andererseits auch nicht sehr stabil ist, oder auch Tinten aus Kohlenstoff oder Graphen, welche sehr dick aufgetragen werden müssen, um eine ausreichende Leitfähigkeit zu erreichen. Das Bi_2Se_3 könnte auch als Additive in solche Tinten eingebracht werden, um deren Leitfähigkeit zu verbessern. Die günstigen Eigenschaften des Bi_2Se_3 beruht dabei auf der perfekten Kristallinität des Materials (Abbildung 5 a) und auf der lateralen Ausdehnung der zweidimensionalen Plättchen, was zu einer dichten Verpackung der Nanoplättchen in den metallisch glänzenden Filmen führt (Abbildung 5 b), und somit zu einem guten Stromtransport.

Als weiteren zweidimensionalen Halbleiter haben wir in Zusammenarbeit mit der Haifa Technion Israel Institute of Technology CrPS_4 untersucht. Während die Volumenkristalle aus der Dampfphase gewachsen werden, wurden von uns durch chemische Exfoliation druckbare Tinten hergestellt. Dieses Material aus mehreren möglichen Metal- PS_4 Verbindungen ausgewählt, weil es ein Halbleiter mit einer direkten Bandlücke ist, und innerhalb dieser Materialklasse einen ungewöhnlichen hohen elektrischen Widerstand aufweist. Dieser macht CrPS_4 neben seinen günstigen optischen Eigenschaften zu einem vielversprechenden Photoleiter. Photoleitungsmaterialien sind die Grundlage sämtlicher Solarzellen, wo diese als Absorber eingesetzt werden. Von uns wurden mit den Tinten aus CrPS_4 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 eine respektable

Photoleitfähigkeit, zeigen ein spektrales Verhalten, welches für Einsätze in Solarzellen fast ideal erscheint, und eine gemessene Detektivität mit vielversprechenden Werten (Abbildung 5 c).

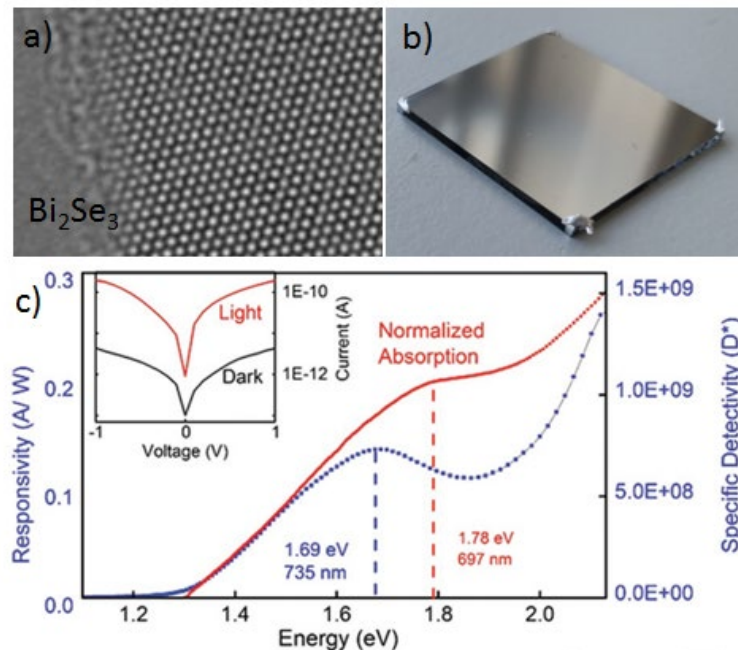


Abbildung 5: Zweidimensionale Halbleiter aus der Lösung. a) Perfekte atomare Anordnung in einem Bi_2Se_3 Nanoplättchen. b) Metallisch glänzender und leitfähiger Film aus lösungsprozessierten Bi_2Se_3 Nanoplättchen. c) Eigenschaften eines gedruckten CrPS_4 Photodetektors. Die Photoresponsivität und Detektivität folgt in etwa dem Absorptionsspektrum und reicht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich. Insert: Strom-Spannungskennlinien in Dunkelheit und unter Beleuchtung.

3 Quantenpunkte für die Infrarot-Optoelektronik

Optoelektronische Bauteile aus lösungsprozessierten Halbleiter Quantenpunkten sind ein attraktives Forschungsgebiet, das in letzter Zeit auch das Interesse von großen Firmen geweckt hat. Apple hatte z. B. projektiert, in das neue „iPhone 11“ Kameras basierend auf Halbleiter Quantenpunkten einzubauen. Letztendlich wurden die Kosten für die industrielle Fertigung solcher Kameras jedoch für zu kostspielig eingestuft, um damit Mobiltelefone ausstatten zu können. Was bleibt, sind allerdings speziellere Anwendungen, wie Kameras im infraroten Spektralbereich, oder auch Infrarot Solarzellen, die im speziellen am Abend oder in den Morgenstunden im Vergleich zu konventionellen Modulen erhöhte Effizienz aufweisen können. Für infrarotes Licht sind vor allem Quantenpunkte aus Blei-Chalkogeniden von Interesse, die in Lösung mit hoher Präzession hergestellt werden können (Abbildung 6 a). Wie auch bei anderen Quantenpunkt oder auch Nanokristallsystemen spielen in elektronischen Bauteilen vor allem die Oberflächenbehandlungen der Nanomaterialien eine große Rolle. Eine relative neue Oberflächenpassivierungsmethode verwendet Perowskit-Halbleiter, welche eine passivierende Schale rund um die Quantenpunkte bilden. Von uns wurde 2017 eine Quasi-epitaktische Schale aus Perowskiten rund um die Quantenpunkte eingeführt. Diese entsteht, wenn das Perowskit und das Quantenpunktmaterial sehr ähnliche atomare Gitterparameter aufweisen. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Loi (Universität Groningen) wurden grundsätzliche photophysikalische Eigenschaften solcher Quantenpunktsysteme untersucht. Vor allem über temperaturabhängige Photolumineszenzmessungen (Abbildung 6 b) wurde ein Problem dieser Quantenpunkt-Perowskit Materialkombination aufgedeckt. Obwohl die Schale vermeintlich perfekt aufgewachsen wurde, bilden sich vermutlich an der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien Defekte, welche die elektrischen Eigenschaften der Quantenpunkt Bauteile beeinträchtigen.

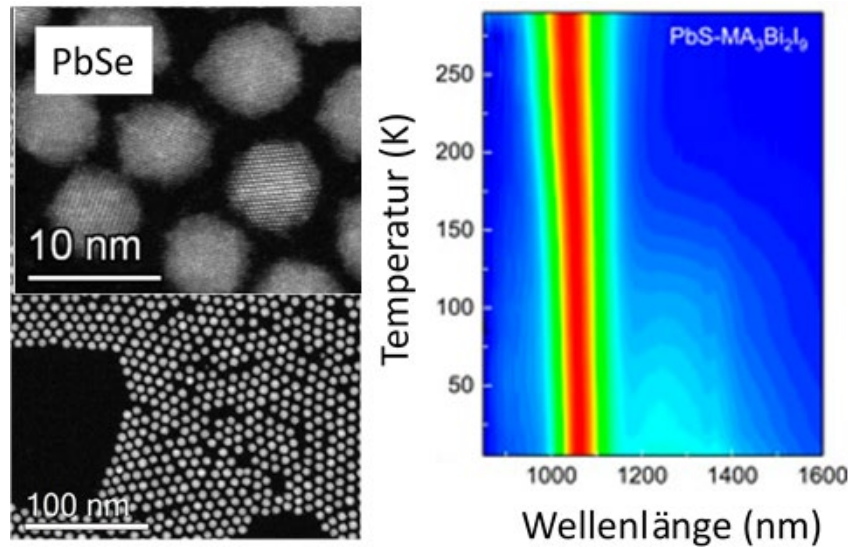


Abbildung 6: b) Quantenpunkte aus dem Blei-Chalkogenid PbSe in verschiedenen Vergrößerungen. b) Die Temperaturabhängige Photolumineszenz ergibt Hinweise auf die Präsenz von Defektzuständen in PbS/Perowskit Kern-Schale Nanokristallen durch über ein zusätzliches Signal bei ca. 1250 nm Wellenlänge.

Um in Bezug auf Defekte bei Bildung eines Kern/Schale Quantenpunktes Abhilfe zu schaffen, haben wir das epitaktische Wachstum von Blei-Chalkogeniden auf Quantenpunkten etwas allgemeiner untersucht. Während die oben beschriebenen Perowskit-Schalen durch einen Ligandenaustausch hergestellt worden sind, haben wir ein Schalenwachstum aus der Lösung angestrebt, dass unter sehr ähnlichen Bedingungen stattfindet, wie das Wachstum der Quantenpunkte selbst. Dazu wurde für das Schalenwachstum das gleiche Ausgangsmaterial verwendet wie beim Wachstum der Quantenpunkte selbst. Getestet wurde Homoepitaxie, also Wachstum einer Schale auf einem Quantenpunkt identischen Materials, als auch Heteroepitaxie. Für den letzteren Fall wurde PbS auf PbSe aufgewachsen, also zwei sehr ähnliche Halbleiter. Dass die Homoepitaxie funktioniert, wurde über die Veränderung der optischen Eigenschaften des Materials eindeutig nachgewiesen. Für die Heteroepitaxie, gibt es ein ähnliches Verhalten wie bei der Honoepitaxie in Bezug auf die optischen Daten, allerdings konnte ein perfektes Schalenwachstum bisweilen nicht eindeutig nachgewiesen werden. Abbildung 6 a) zeigt eine hochaufgelöste transmissionselektronische Aufnahme von PbSe nach dem Überwachsen, ohne dabei eindeutig ein Kern/Schalen Modell zu zeigen. Dafür mag die nicht ausreichende Dicke der aufgewachsenen Schicht verantwortlich sein, oder eine Vermischung der Kern und des Schalenmaterials während des Aufwachsens. Unabhängig von dem genauen Resultat der epitaktischen Wachstumsexperimente wurden aus den Blei-Chalkogenid Quantenpunkte Photodioden hergestellt. Das Besondere war dabei, dass diese Photodioden mit Methoden gedruckt worden sind, die auch in Rolle-zu-Rolle Druckanlagen angewendet werden. Das Konzept dieser gedruckten Bauelemente wurde von einem Nachwuchswissenschaftler der Arbeitsgruppe auf mehreren Wettbewerben erfolgreich vorgestellt, was auch zu mehreren Gewinnen bei diesen Wettbewerben geführt hat.



Abbildung 7: Aufbau für die Synthese kolloidaler Nanokristalle (Quantenpunkte)

4 Organische Pigmente zur elektrokatalytischen Wasserspaltung

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. Von uns wurde 2016 gezeigt, dass EPI als Photoelectrocatalyst für die effiziente Generation von Wasserstoffperoxid, einem alternativen Treibstoff der zu Wasser verbrennt, herangezogen werden kann. 2017 wurden diese katalytischen Eigenschaften benutzt, um biologische Zellen ex-situ optisch anzuregen – ein Vorgang der in einer erblindeten Retina möglicherweise eine gewisse Sehfähigkeit wiederherstellen könnte.



Abbildung 8: Aufdampfanlage für organische Pigmenthalbleiter

In diesem Projektjahr wurde die Möglichkeit untersucht, mit EPI 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 EPI (Abbildung 9a) wurden Heterostrukturen untersucht, die über eine erleichterte Ladungstrennung zu einer Verbesserten Wasserspaltung führen sollten. Die Heterostrukturen bestanden dabei aus EPI und einem EPI-Derivat (2F-EPI). Beide Materialien zeigen ähnlich kristalline Eigenschaften, sie formen jeweils dünne Plättchen (Abbildung 9b), weshalb sie bei einer Abscheidung gut aufeinander wachsen. Mit diesen EPI-Heterostrukturen wurde einerseits die photokatalytische Generation von H_2O_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.

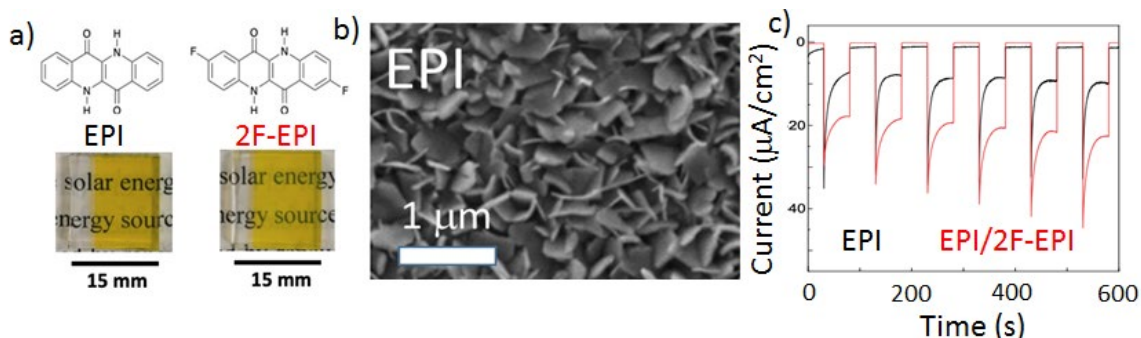


Abbildung 9: Strukturformeln und aufgedampfte Filme aus Epindolidione (EPI) und einem Derivat mit zwei angehängten Fluor Atomen. b) Oberfläche einer aufgedampften EPI-Schicht bestehend aus dünnen Blättchen. c) Strom gemessen in einer Elektrochemischen Zelle unter gepulstem Lichteinfall und Sauerstoffentzug. Die Stromstärke, die der Wasserstoffgeneration proportional ist, ist für eine zweilagige Heterostruktur deutlich erhöht.

5 Schlussworte

Unterschiedlichen Materialklassen lösungsprozessierbarer Halbleitermaterialien sind in diesem Projekt synthetisiert und untersucht worden. Im Speziellen wurden epitaktische Wachstumsmethoden entwickelt, mit dem besonderen Augenmerk auf die Optimierung von Materialqualität. Nur defektarme Halbleiter ermöglichen die Entwicklung von gut funktionierenden elektronischen Bauelementen, unabhängig davon ob diese für die Energiegewinnung, deren Umwandlung oder für andere Zwecke verwendet werden. Obwohl sich dieses Projekt sehr mit Grundlagenthemen befasst, gibt es Schnittpunkte mit der Industrie, die sich unter anderem für Infrarot-Detektoren oder auch Röntgendetektoren interessieren. Die größten Fortschritte wurden in diesem Projektjahr mit Perowskit-Halbleitern erzielt, die nicht nur als Absorberschichten in Solarzellen von großem Interesse sind, sondern auch als Liganden in Quantenpunkt Bauelementen oder in Röntgendetektoren.

6 Vorträge & Poster 2019

- (1) 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 Perowskites by InkJet Printing. nanoGe Fall Meeting19, Berlin, November 8 (2019)
- (2) 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)
- (3) J.E. Elia, I. Levchuk, A. Osvet, K. Forberich, M. Sytnyk, M. Batentschuk, T. Unruh, W. Heiss and Christoph J. Brabec. Epitaxial Growth of CsPbBr₃ 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)
- (4) W. Heiss, Solution processed semiconductors for medical applications, 27th Assembly of Advanced Materials Congress, Conference Centre, M/S Mariella, Stockholm (2019)
- (5) W. Heiss, M. Sytnyk, Epitaxial metal halide Perowskites by inkjet printing, ngse4-Next Generation Solar Energy conference, December 8-10 (2019)

7 Veröffentlichungen 2019

- (1) M. Sytnyk, S. Deumel, S. F. Tedde, G.J. Matt, W. Heiss, A Perspective on the Bright Future of Metal Halide Perowskites for X-Ray Detection. Appl. Phys. Lett. 2019, 115 (19). (C)
 - (2) 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)
 - (3) A. K. Budniak, N. A. Killilea, S. J. Zelewski, M. Sytnyk, Y. Kauffmann, Y. Amouyal, R. Kudrawiec, W. Heiss, E. Lifshitz, Exfoliated CrPS₄ with Promising Photoconductivity. Small 2019, 1905924, 1–10. (B)
 - (4) 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)
 - (5) 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)
- [A ...publications in Nature or Science, B...publications with an impact factor > 10, C others with peer review system]

FORSCHUNGSBEREICH

Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 67540

Web
www.encn.de/netze

Elektrische Netze

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

Projektbericht 2019

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 und der Simulation hybrider Netzstrukturen (AC/DC).

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 ENGiNe – das Mikronetz- und Energiespeicherlabor am EnCN

Stromspeicher sind eine Schlüsseltechnologie zur Integration des stetig wachsenden Anteils regenerativer Energieträger in das elektrische Energienetz. Neben der effizienten Selbstnutzung dezentral erzeugten Stroms können Speicher in Zukunft auch zur Vermeidung von Netzengpässen im Verteilnetz beitragen sowie zur Umsetzung effizienter Inselnetze.

Die Verknüpfung von dezentralen regenerativen Energieanlagen wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie Lasten und Speichern innerhalb eines lokalen Verbunds schafft hierbei zusätzliche Flexibilität und wird als Mikronetz bezeichnet.

Die Arbeitsgruppe entwickelt und erweitert das hybride Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe seit der ersten Inbetriebnahme im Jahr 2017 sukzessive. ENGiNe dient als Demonstrationsanlage auf dem Gebiet der Speicherforschung und Netzintegration regenerativer Energien und integriert dabei alle relevanten Bereiche einer dezentralen regenerativen Energieversorgung in der Niederspannung. Der schematische Aufbau der Anlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

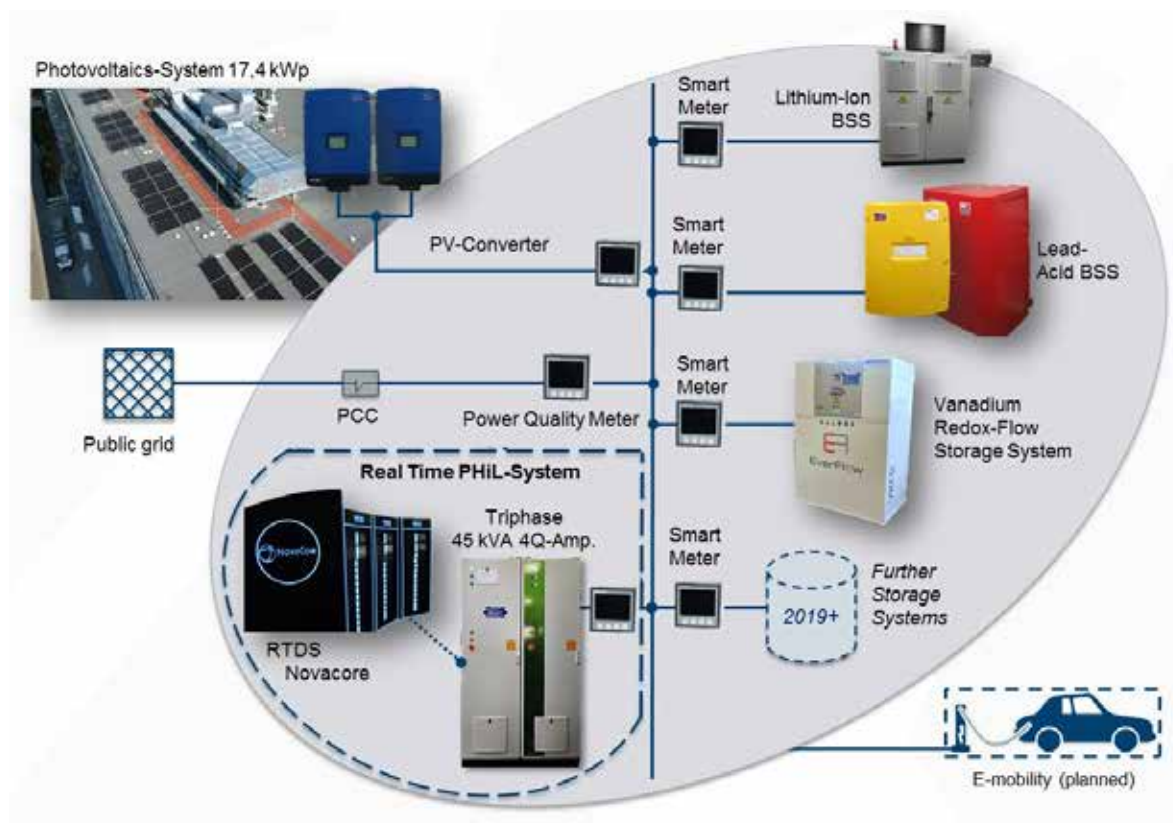


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Demonstrationsanlage

Für mobile sowie stationäre Stromspeicheranwendungen werden derzeit vorwiegend auf Lithium-Ionen basierende Speichertechnologien eingesetzt, da diese einen hohen Wirkungsgrad, kompakte Bauform und Wartungsfreiheit garantieren, sowie Kostenvorteile durch deren starke Verbreitung aufweisen. Zunehmend rücken jedoch auch andere Speichertechnologien in den Fokus. Gerade für stationäre Anwendungen ist die Redox-Flow-Batterie eine interessante Alternative. Ein auf der Vanadium-Technologie basierendes Redox-Flow-Batteriespeichersystem der SCHMID Energy Systems GmbH mit einer Nennleistung von 4,6 kW und einer Netto-Speicherkapazität von 15 kWh wird seit 2017 im Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe betrieben. Die Redox-Flow Technologie zählt zu den elektrochemischen Energiespeichern. Im Gegensatz zu herkömmlichen Batterietechnologien lassen sich die Nennleistung und die speicherbare Energiemenge unabhängig voneinander skalieren und somit den individuellen Anforderungen anpassen. Vorteilhaft gegenüber der Lithium-Technologie ist hierbei vor allem das Alterungsverhalten. Um die Vorteile der

einzelnen Speichertechnologien im realen Netzbetrieb zu untersuchen, integriert das Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe unterschiedliche Speichersysteme. Neben dem Vanadium-Redox-Flow Speicher verfügt die Anlage über weitere Lithium-basierte Batteriespeicher und eine Blei-Gel-basiertes Speichersystem. In Zusammenarbeit mit der Siemens AG wurde im Projektjahr 2018 und 2019 eine umfangreiche Modellierung der Speichersysteme durchgeführt. Hierfür wurden die Speicher vermessen, um die spezifischen Eigenschaften und das Verhalten der Systeme zu ermitteln, bevor diese dann in ein Modell überführt wurden. Anschließend wurden Betriebsstrategien für den hybriden Speicherbetrieb entwickelt.

Gespeist wird das Mikronetz über eine Photovoltaikanlage mit einer Nennleistung von 17 kWp, welche seit Mitte 2018 auf den Dachflächen des EnCN-Gebäudes in Betrieb ist und in Abbildung 2 dargestellt ist.



Abbildung 2: Photovoltaikanlage auf dem Dach des EnCN

Im vergangenen Projektjahr wurde der Laboraufbau um ein Echtzeitsimulationssystem für Hardware-in-the-Loop-Anwendungen des kanadischen Herstellers RTDS Technologies ergänzt. Dieses bietet die Möglichkeit, dem realen Mikronetz simulative Anlagenkomponenten (beispielsweise weitere Speichersysteme oder regenerative Energieanlagen) hinzuzufügen oder als Netzsimulator zu fungieren, um auch Betriebssituationen zu testen, die im realen Netz nur unvorhersehbar eintreten. Als Schnittstelle zwischen der Echtzeitsimulation und dem realen Labornetz dient ein hochdynamischer, bidirektionaler Leistungsumrichter mit einer Gesamtleistung von 45 kVA des Herstellers Triphase von National Instruments. Im kommenden Projektjahr folgen erste Untersuchungen mit dem Echtzeitsimulator in Kombination mit dem Mikronetz- und Energiespeicherlabor ENGiNe über eine schnelle Kommunikationsverbindung über Lichtwellenleiter (AURORA), wie in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Integration simulativer Anlagenkomponenten in das reale Mikronetz durch Hardware-in-the-Loop-Simulation

2 Real Time Simulation (RTS) Labor

Am 29. März 2019 wurde am Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) erfolgreich ein leistungsstarkes Echtzeitlabor eingeweiht. Einsatzbereiche sind Tests für die Entwicklung von Schutzsystemen, die Prüfung von Energiespeichersystemen sowie Forschung im Bereich der Netzintegration von HGÜ- und FACTS.

Der am LEES installierte Simulator ist laut Herstellerangaben (RTDS Technologies Inc.) nicht nur der leistungsstärkste Echtzeit-Netzsimulator an einer Universität in Europa, sondern zählt auch zu den fünf leistungsstärksten Universitätssimulatoren der Welt.

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).

Die immer komplexeren Systeme der elektrischen Energieversorgung, wie beispielsweise intelligente und lernfähige Stromnetze, lassen sich mit reinen Software-Simulationen nicht ausreichend untersuchen. Die Software-Simulation greift auch aus wissenschaftlicher Sicht zu kurz, da qualifizierte Aussagen hinsichtlich der Realisierbarkeit komplexer Strukturen hierdurch nicht oder nur eingeschränkt möglich sind. Des Weiteren sind Simulationsergebnisse oft angreifbar, da in Simulationsprogrammen physikalische Grenzen leicht umgangen werden können und/oder wesentliche Methoden nicht berücksichtigt werden. Hierzu gehören beispielsweise die Kühlung und der Schutz von Komponenten, das Schaltungslayout, die Berücksichtigung parasitärer Effekte, die Eigenbedarfsversorgung sowie Verlustmechanismen und Wirkungsgrade. Insofern werden auch im internationalen wissenschaftlichen Umfeld verstärkt Hardwarelösungen vorausgesetzt, beispielsweise bei Veröffentlichungen, in Kooperationen oder in Großforschungsprojekten. Auch das industrielle Umfeld in der Metropolregion Erlangen/Nürnberg stellt zunehmend erweiterte Anforderungen an eine hardwarebasierte Forschung in der Elektrizitätsversorgung. Für die Studierenden entstehen durch praxisnahe Tätigkeitsfelder zusätzliche Möglichkeiten für die Durchführung von Abschlussarbeiten, Forschungs- und Laborpraktika.

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

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

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

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

Die Grundidee einer solchen Hardware-in-the-Loop (HIL) Untersuchung besteht darin, die Regelstrecke in Echtzeit zu simulieren und mit einer realen Version des Reglers zu verbinden. Abbildung 4 skizziert das Prinzip einer HIL Untersuchung.

Hardware in the Loop

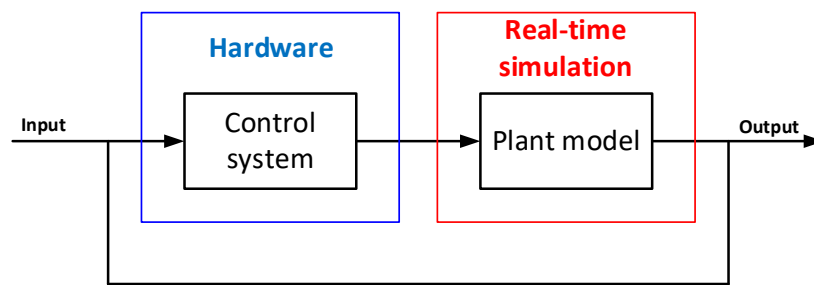


Abbildung 4: Prinzip einer HIL Simulation

Kernkomponente des Labors bildet der Digitale Echtzeitsimulator (RTDS), der auf der Multicore-Verarbeitungsplattform NovaCor basiert und die Simulation komplexerer Netze in Echtzeit ermöglicht (siehe Abbildung 5). Der installierte Simulator verfügt über beeindruckende E/A-Funktionen für den Anschluss realer Geräte. Mit mehr als 500 Kanälen für analoge und digitale Ein- und Ausgänge kann das Forschungsteam umfangreiche externe Schutz-, Steuer- oder Leistungsgeräte an das simulierte Netz anschließen. Leistungsverstärker von Omicron, TriphaseNV sowie Spitzenberger & Spies, die ebenfalls zum Labor gehören, ermöglichen den Anschluss von Geräten der Primär- und Sekundärtechnik für Hardware in the Loop oder Power Hardware in the Loop Untersuchungen bis hin zu 50 kVA. Umfangreiche Protokolle (z.B. IEC 61850), sowie ein leistungsstarker Satz von 12 GTFPGA-Einheiten runden den Simulator ab. Diese GTFPGA-Einheiten können besonders rechenintensive Komponenten oder Teilnetze simulieren.

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



Abbildung 5: RTDS System

<https://www.rtds.com/friedrich-alexander-university/>

3 Kopernikus ENSURE

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

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



Abbildung 6: Modellierung von AC/DC Systemen am Analog Hybrid Simulator

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

Die erste Projektphase von Kopernikus ENSURE wurde Ende 2019 erfolgreich abgeschlossen. Der LEES freut sich auf den baldigen Start der zweiten Phase, die ebenso wie die erste Phase für drei Jahre ausgelegt ist.

<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/neue-netzstrukturen>

4 InnoSys 2030

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

In InnoSys 2030 arbeitet der LEES an der Entwicklung automatisierter Systemführungsprozesse, unter dem Aspekt der Stabilitätsbewertung und der dynamischen Adaption intelligenter Aktoren. Zu den betrachteten Aktoren gehören sowohl leistungselektronische Stellglieder (HGÜ, FACTS) als auch der Netzschutz. Durch die aktive und systemdienliche Steuerung derzeit rein passiv betriebener Aktoren, werden kurative Betriebsführungsprozesse ermöglicht und können den klassischen rein präventiven Konzepten gegenübergestellt werden. Dies erlaubt eine Beurteilung des Einflusses kurativer Maßnahmen auf die Systemsicherheit. Abbildung illustriert den angestrebten Prozess, wobei der Schwerpunkt der Untersuchung für InnoSys 2030, die Erstellung der Testumgebung zum Vergleich von kurativem und präventivem (n-1)-sicheren Betrieb, rot eingrahmt ist. In dem zukünftigen Prozess können die aus der Netzsicherheitsrechnung abgeleiteten Einstellwerte der Aktoren sowie Handlungsempfehlungen der Netzführung präventiv bereitgestellt werden.

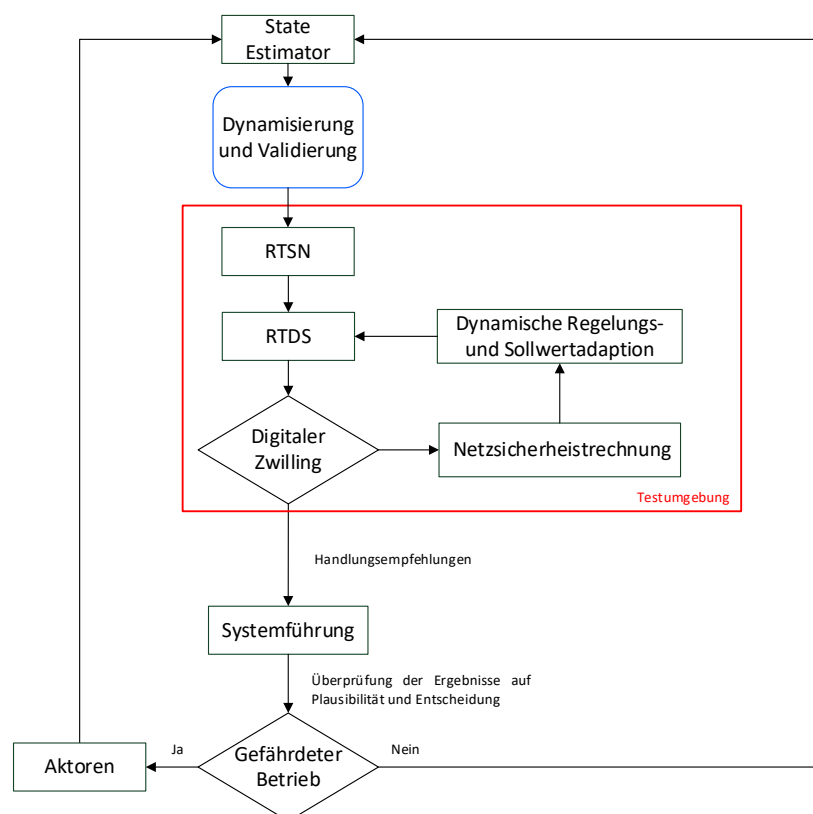


Abbildung 7: Prozess zur Kopplung von State-Estimation und Echtzeitsimulation¹

Darüber hinaus verfolgt der LEES den Ansatz, die Stabilität des Netzes zu bewerten und durch präventive und kurative Systemeingriffe zu verbessern. Durch ein vorschaubasiertes Dynamic Security Assessment sollen bereits zukünftige kritische Netzzustände erkannt und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die Verwendung von Vorschaudaten entschärft die zeitlichen Restriktionen des operativen Betriebs und ermöglicht es Gegenmaßnahmen einzuleiten und den Maßnahmeneinsatz mit Betreibern vor- und nachgelagerter Netze zu koordinieren.

Schutzsysteme sind für den sicheren und zuverlässigen Betrieb des Energieversorgungsnetzes unverzichtbar. Die Schutztechnik wird derzeit in den Bediensystemen der Leitstellen nur eingeschränkt berücksichtigt. Im Bereich der

¹ RTSN: Real Time System Snapshots
RTDS: Real Time Digital Simulator

Schutztechnik soll daher eine engere Verzahnung mit der Systemführung erfolgen und so Schutzfehlfunktionen aus einer ganzheitlichen Systemsicht bereits im Vorfeld vermieden werden. Auf Relaisebene erfolgt eine kriterielle und funktionelle Erweiterung der Schutztechnik und deren kommunikative Vernetzung auch mit entfernten Messstellen. Die insbesondere in den Netzleitstellen zunehmende Komplexität erfordert Werkzeuge für eine integrierte und automatisierte Analyse und Bewertung von Netz- und Schutzsystemen.



Abbildung 8: Untersuchungen am Schutzprüfstand

Hinsichtlich der Schutzbewertung sind dazu systemrelevante Bewertungskriterien zu entwickeln. Zudem soll eine automatisierte Adaption des Schutzsystems an den Netzzustand sowohl bezüglich der Schutzparameter als auch der Schutzfunktion ermöglicht werden. Es sind sowohl das stationäre als auch das dynamische Verhalten des Netzes sowie multikriterielle Schutzsysteme (z.B. SPS) zu berücksichtigen. Für eine vollständige Analyse sind hier sowohl das Vor-Fehler und Fehlerverhalten sowie auch das Nach-Fehlerverhalten des Netzes und der Schutztechnik relevant. In InnoSys 2030 entwickelt der LEES hierzu Systemführungsansätze weiter, arbeitet an der Optimierung von Schutzalgorithmen und koppelt in Mitsystemsimulationen die Stabilitätsbewertung mit der Schutzanalyse.

<https://www.innosys2030.de/>

5 Schlussworte

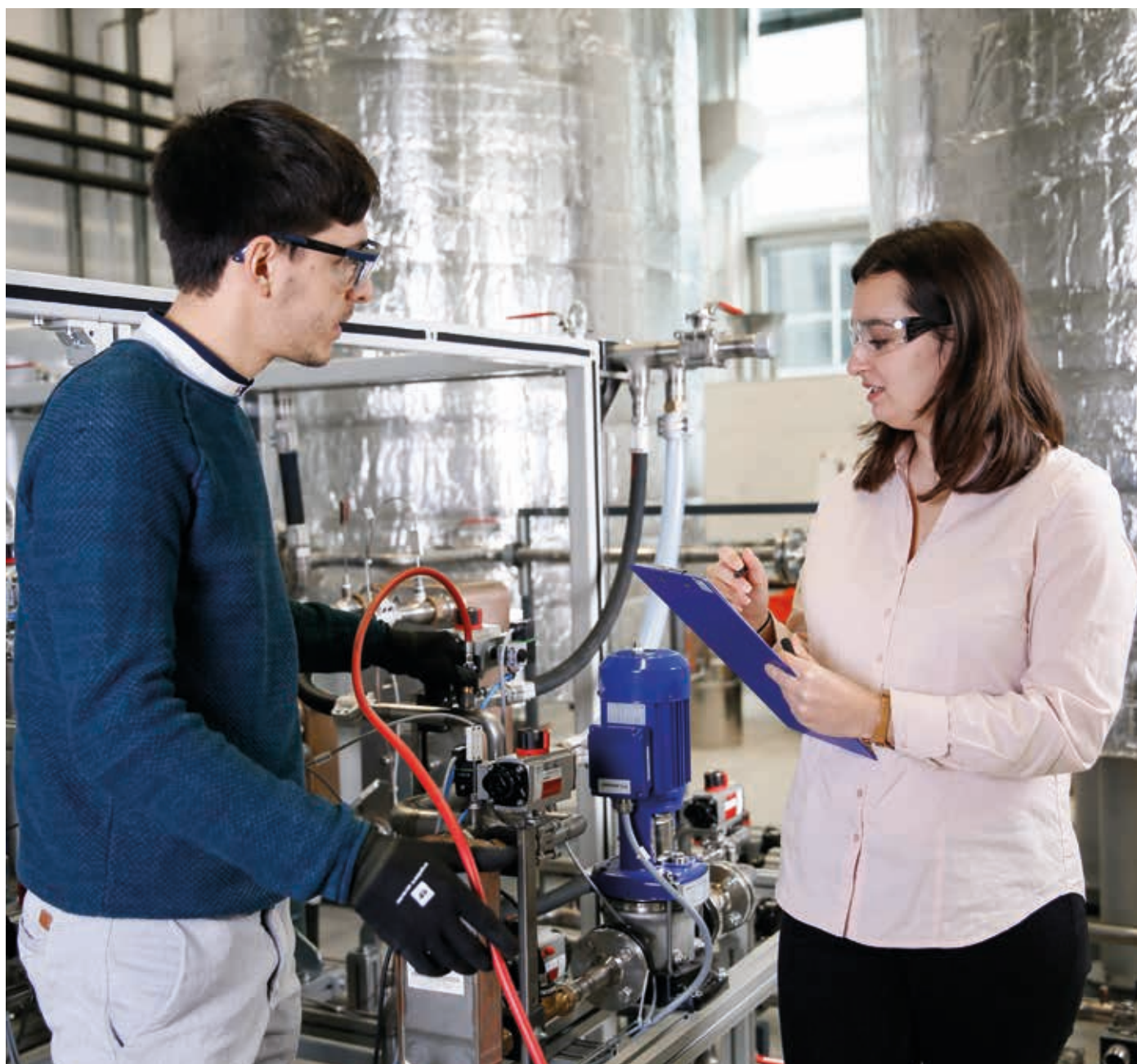
Die Arbeitsgebiete des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme im Forschungsbereich Netze sind von zunehmender Bedeutung zur Aufrechterhaltung einer hohen Versorgungssicherheit und Zuverlässigkeit in der deutschen Energieversorgung, was eine zunehmend verstärkte Zusammenarbeit mit Übertragungsnetzbetreibern erklärt. Die intensiven Kooperationen stärken zudem das zukünftige Potential von Forschung und Entwicklung in der Metropolregion Nürnberg, Fürth, Erlangen.

6 Veröffentlichungen 2019

- [1] M. Richter; G. Mehlmann; M. Luther, Grid Code Compliant Modeling and Control of Modular Multilevel Converters during Unbalanced Faults. UPEC 2019, Bukarest, 2019.
- [2] G. J. Meyer *et al.*, Digital System Protection Design – A new Toolchain for Protection System Automation. CIRED International Conference on Electricity Distribution, Madrid, 2019
- [3] 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

FORSCHUNGSBEREICH

Speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
juergen.karl@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 9021

Web
www.encn.de/speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
peter.wasserscheid@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 27420

Web
www.encn.de/speicher

Speicher A

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

Projektbericht 2019

Der Projektteil „Speicher mit Systemrelevanz bis 2022“ fokussiert auf Technologien und Konzepte, die es erlauben,

elektrische Energie aus Wind und Photovoltaik kurzfristig, innerhalb der nächsten 10-15 Jahre, möglichst bis 2022,

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

und damit in systemrelevanten Größenordnungen zu speichern. Entsprechend dieser drei Speicheraufgaben und -strategien werden in den Teilprojekten Konzepte erarbeitet und als Prototypen demonstriert.

Im den ersten beiden Projektjahren der 2. Förderphase des ENCN und lag der Fokus der Arbeiten zunächst auf der detaillierten Konzeption und numerischen Untersuchung der vorgeschlagenen Systeme als Vorbereitung für die Demonstration der Technologien in den geplanten Versuchsanlagen und anschließend auf Auswahl und Beschaffung von Komponenten sowie schließlich dem Beginn des Aufbaus von Versuchsanlagen. Im Jahr 2019 wurden bereits einige Versuchsanlagen fertiggestellt, auch konnte die von einigen Forschungsinstituten überwiegend theoretische oder simulationsbasierte Arbeit im Detail fortgeführt werden.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATOR
Prof. Dr. Jürgen Karl

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Juergen.karl@fau.de

Telefon
+49 911 5302 9021

Web
www.encn.de

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

1.1 Thermodynamische Kreisprozesssimulation und Wirtschaftlichkeitsanalyse

Bernd Eppinger, Lars Zigan, Stefan Will (LTT)

Die dynamische Simulation der beiden Teilprozesse (Wärmepumpe und ORC) hat die Erprobung von Regelungsstrategien für ein verbessertes Anfahrverhalten ermöglicht. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte die notwendige Leistung einer Zusatzbeheizung für die Unterstützung des Anfahrvorganges der Wärmepumpe ermittelt werden. Die dadurch deutlich verkürzte Anlaufzeit wurde in der Regelungsstrategie umgesetzt.

Zusammen mit dem Lehrstuhl INF7 konnte ein Modell zur Abschätzung des Verhältnisses der installierten PV- und HP-Leistungen (in Form des Solarfaktors, S) erstellt und deren Auswirkung auf den Teillastwirkungsgrad der Anlage ermittelt werden. Durch die Verwendung von meteorologischen Daten der Sonneneinstrahlung aus dem Jahr 2016 konnte mit Hilfe des Modells für verschiedene Solarfaktoren eine zu erwartende Teillasteffizienz (in Form des Power-to-Power-Wirkungsgrads P2P) über den Jahresgang ermittelt werden, siehe Abbildung 1. Die gewonnenen Ergebnisse konnten auf der IRES 2019 (siehe Publikationsliste) einem internationalen Fachpublikum präsentiert werden. Das Modell bietet das Potential auch in konkreten Fallstudien bei bekannten Zeitprofilen (Last, Sonne, Wind) zum Einsatz zu kommen und die Verknüpfung zwischen realen Daten und Simulationsergebnissen herzustellen. Durch die Implementierung, der aus den dynamischen Simulationen gewonnen Erkenntnissen und Anfahrstrategien ist als weiterer Schritt eine Verbesserung der Modellgenauigkeit möglich.

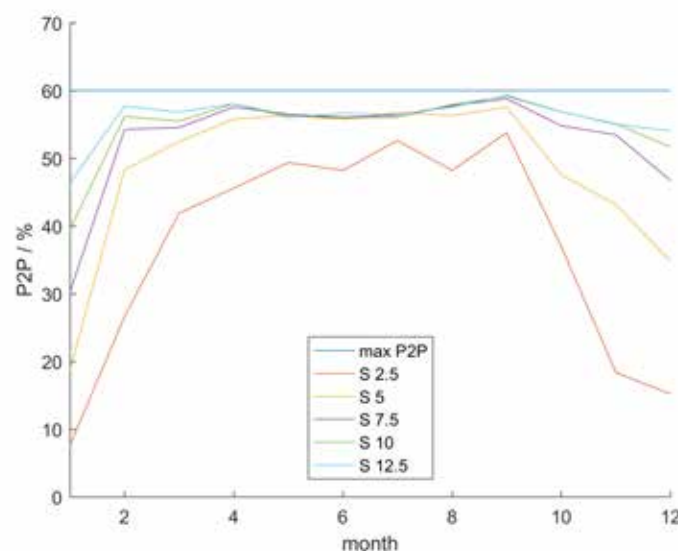


Abbildung 1: Teillastwirkungsgrad (P2P) des HP-ORC-Systems für verschiedene Solarfaktoren für das Jahr 2016

Ebenfalls in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl INF7 konnten Fallstudien für die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren erstellt werden. Die dadurch verwendeten Parameter haben eine fallspezifische Optimierung des Wirkungsgrades der Anlage um über 10 % ergeben und fließen in die weiteren Untersuchungen von Seiten des INF 7 ein.

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

Daniel Steger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Das vergangene Jahr 2019 war von der Fortsetzung der Planung und dem Aufbau der HP-ORC Pilotanlage geprägt: Hierzu wurde zunächst ein detailliertes CAD-Modell der Anlage erstellt, welches als Grundlage für die Fertigung und den Aufbau diente. Die Anlage besteht aus einem Grundrahmen, in den alle Komponenten (Wärmeübertrager, Kompressor, Expander, Pumpen, etc.) eingebracht werden. Die Verbindung erfolgt über Rohrleitungen, deren Geometrien individuell gefertigt werden. Parallel zum mechanischen Aufbau erfolgt die Programmierung der Anlagensteuerung. Hier wurde im Besonderen darauf Wert gelegt, dass ein sicherer Betrieb mit einem hohen Automatisierungsgrad erreicht werden kann. Ein Meilenstein war der Umzug der Pilotanlage in das Speicherhaus am Energie Campus Nürnberg, der im Herbst erfolgen konnte.

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



Abbildung 2: Montage der kombinierten Wärmepumpe-ORC Pilotanlage (Foto: EnCN/Zellner)

Die Fördermittel wurden im vergangenen Jahr nicht vollständig ausgeschöpft, da bei jeder Komponente eine enge und teilweise lange dauernde Absprache mit dem Hersteller notwendig ist, um eine optimale Lösung zu finden. Auch wenn der Aufbau schon sehr fortgeschritten ist, werden die Arbeiten sich aufgrund dessen noch bis in das Frühjahr 2020 erstrecken. Der Kauf weiterer benötigter Komponenten verlagert sich entsprechend.

Insgesamt befindet sich der Aufbau der Pilotanlage noch im beantragten Zeitplan, außerdem kann von zukünftige Verzögerungen bislang nicht ausgegangen werden, sodass dem Erreichen der Projektziele aus momentaner Sicht nichts im Wege steht.

1.3 Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für die Modellregion Wunsiedel

Tanja Schneider, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Neben der technischen und wirtschaftlichen Evaluierung des Einsatzes der reversiblen ORC-Technologie am Standort Wunsiedel, wurde das Modell für einen zweiten bayerischen Standort erweitert. Dazu wurden anhand realer Lastgänge des Versorgungsgebiets Grafing weitere Einsatzszenarien für die reversible ORC-Technologie untersucht. Hierzu wurden diesmal drei allgemeine Szenarien festgelegt, welche zukünftig auch auf andere Versorgungsgebiete und Standorte leicht übertragbar sind:

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_{el} 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_{Wärme} und 500 €/kW_{el}, 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 3). 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.

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.



Abbildung 3: 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_{gespeichert} 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 den übergeordneten Bayernwerken 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 im Netz verbraucht, 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 4 links) dargestellten Stromkosten. Diese setzen sich aus den PV-Erzeugungskosten, dem resultierenden Wirkungsgradverlust und den spezifischen Investitionskosten pro entladene Kilowattstunde Strom zusammen. Eine Reduktion der Investitionskosten bei größeren Nennleistungen sowie durch Skaleneffekte wird daher ebenso wie Prozessverbesserungen und Wirkungsgraderhöhungen zusätzlich zu einer Kostenreduktion führen (s. Abbildung 4 rechts).

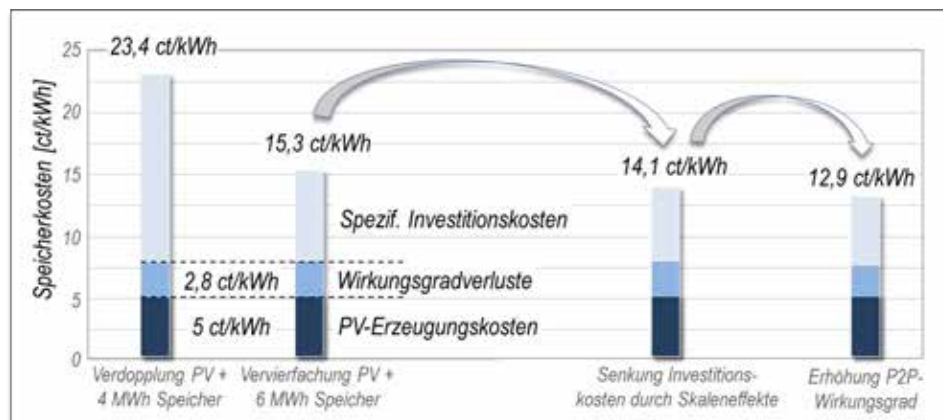


Abbildung 4: Zusammensetzung der Stromgestehungskosten einer PV-Erzeugung mit reversiblen ORC für den Fall Grafing

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 5 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 Speichereinsatz 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.

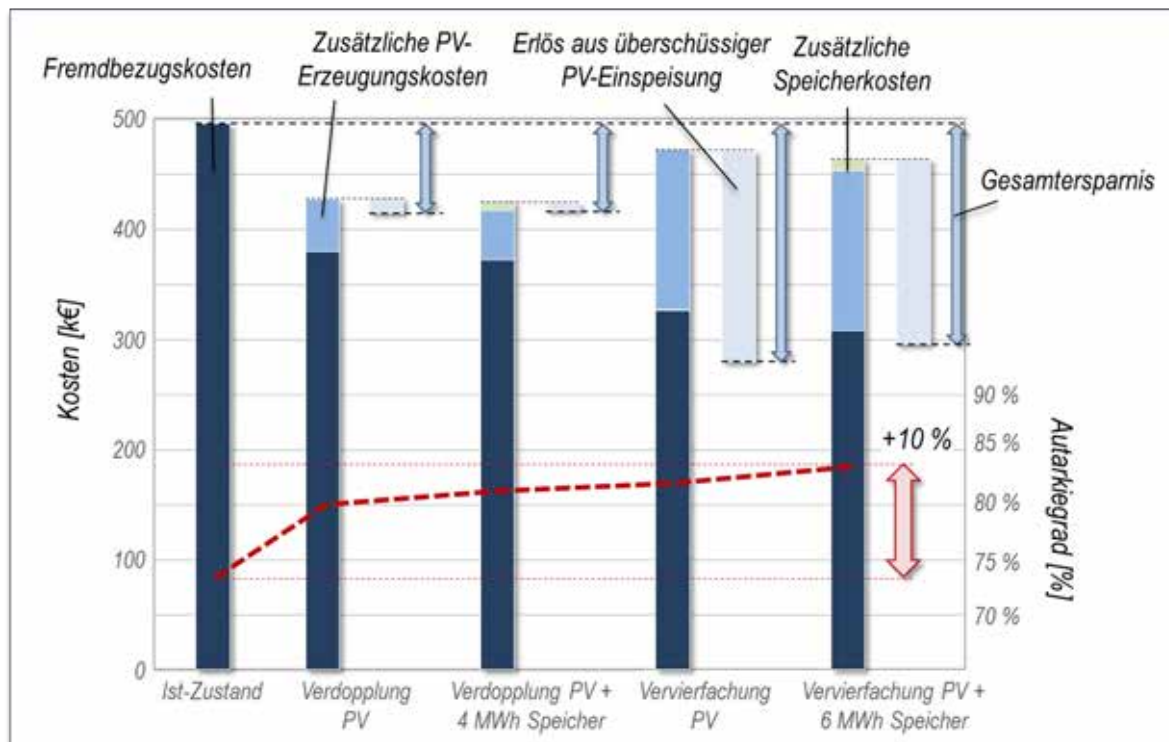


Abbildung 5: Kostenreduktion durch die Erhöhung der PV-Erzeugung und dem Einsatz der reversiblen ORC-technologie im Fall Grafing für ca. 3.500 MWh/a

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

2.1 Sensibler Wärmespeicher für aufgewertete Niedertemperaturwärme

Christoph Regensburger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Das Teilprojekt Speicher A 1.2 wird weiterhin von Christoph Regensburger, wissenschaftlicher Mitarbeit am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik bearbeitet. Die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus den Teilprojekten in Speicher A 1.1 und Speicher A 1.2 wird weiterhin durch monatliche Treffen sichergestellt.

Das Jahr 2019 war geprägt durch den Aufbau der Speicheranlage. Im Januar 2019 erfolgte die Bestellung der Hauptkomponenten wie Pumpe, Wärmeübertrager, Hähne und Speicherbehälter. Anschließend erfolgte der Zusammenbau der Anlage als CAD-Modell. Diese ermöglichte bereits vorab eine optimale Platzierung der Komponenten in der Halle.

Ausgehend von dem CAD-Modell erfolgte das Design der Rohrleitungen und Trägergestelle. Dabei besteht die Trägerkonstruktion aus modularen Einzelgerüsten, die einen einfachen Transport an den Energiecampus Nürnberg möglich machen. Aufgrund der Behälterhöhe von 3,9 Metern wurde ein besonderes Augenmerk auf die einfache

Handhabung der Rohrabschnitte und Gestelle gelegt. Sowohl die Rohrleitungen, wie auch die Gestelle wurden in der lehrstuhleigenen Werkstatt gefertigt. Parallel dazu erfolgte die Auslegung des Ausgleichssystems, dass die thermische Volumenausdehnung im System kompensiert. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Sicherheit des Systems im Fehlerfall gelegt. Neben der automatischen Abschaltung durch die Steuerung zur Vermeidung von gefährlichen Systemzuständen wurde parallel ein Überdruckventil und Unterdruckventile zur Wahrung der Anlagensicherheit beim Versagen der Steuerung vorgesehen.

Der Aufbau der Anlage am Energie Campus Nürnberg erfolgte im Oktober 2019 rechtzeitig zur Langen Nacht der Wissenschaft. Die Montagearbeiten sollen im ersten Quartal 2020 abgeschlossen werden. Zum Ende des Jahres 2019 wurde parallel dazu die Programmierung der Steuerung begonnen.



Abbildung 6: Anlagenzustand am 18.10.2019 in Vorbereitung zur Langen Nacht der Wissenschaften

Die Projektmittel wurden bereits nahezu vollständig aufgebraucht, da bis auf die Messtechnik alle großen Komponenten bereits bestellt und bezahlt wurden. Die restlichen Mittel werden in den kommenden zwei Jahren dazu verwendet werden, den Betrieb der Behälter zu ermöglichen und Messungen am System durchzuführen. Auch wenn keine Zuweisung von neuen Mittel in den Jahren 2020 und 2021 erfolgt erstrecken sich die Arbeitspakete bis Ende 2021.

Insgesamt befindet sich das Projekt im Zeitplan. Die leichte Verschiebung der Aufbaufertigstellung bis ins Jahr 2020 wird durch die bereits begonnene Leittechnikprogrammierung kompensiert. Nach Fertigstellung der Anlage werden weitere Optimierungen zur Minimierung der Vermischungszone erfolgen. Dadurch wird die nutzbare Kapazität des Speichers, bei gleichbleibendem Gesamtvolumen, vergrößert.

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

Simon Pöllinger (ZAE)

Im Projektbericht 2018 wurden vom Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik die Ergebnisse zu Untersuchungen des Stoffsystems Magnesiumchlorid-Wasser ($\text{MgCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) als Wärmespeichermaterial bis 150°C vorgestellt. Es wurde empfohlen, den Fokus auf den Einsatz von $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Magnesiumchloridhexahydrat) als reines Latentspeichermaterials (Phasenwechselmaterial, PCM) zu legen und die Nutzung der Hydratisierungswärme in einem thermochemischen Speicher nicht weiter zu verfolgen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde im vergangenen Jahr am ZAE Bayern ein Latentwärmespeicher mit einer thermischen Speicherkapazität von 500 MWh konzipiert und ausgelegt.

2.2.1 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^3 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.

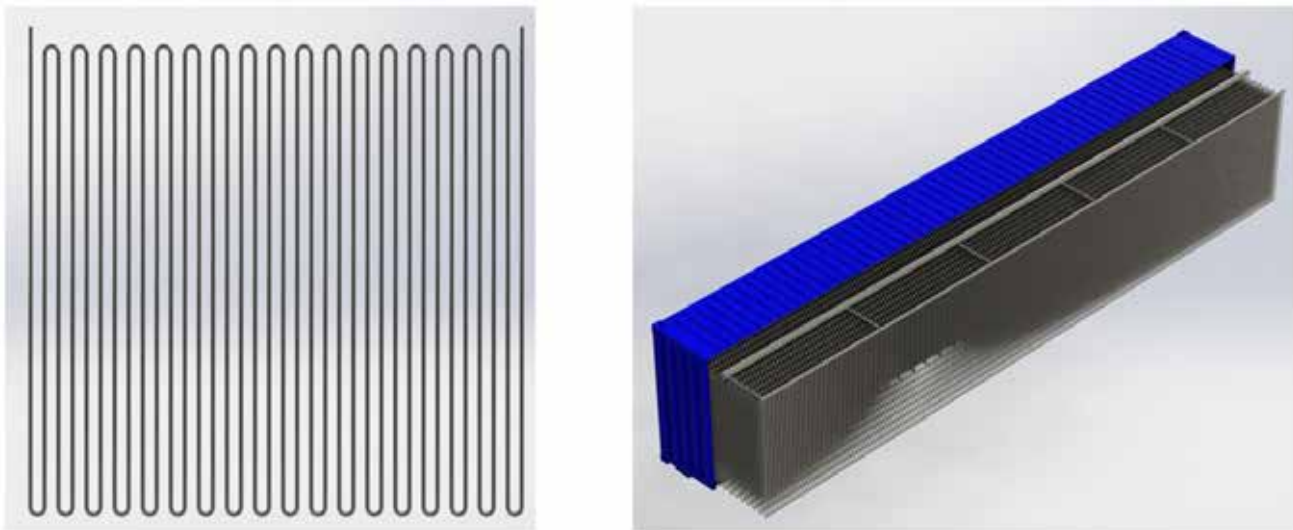


Abbildung 7: Rendering eines Wärmeübertragerelements (links) und eines kompletten Speichermoduls (rechts)

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.

2.2.2 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 m³/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.

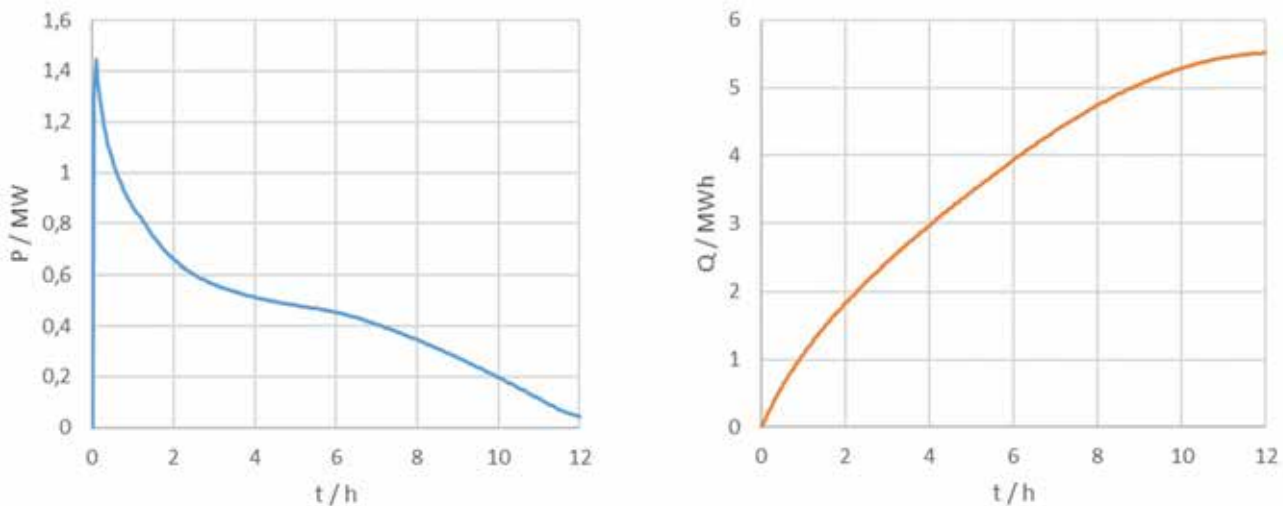


Abbildung 8: Verlauf der thermische Leistung eines Speichermoduls (links) und der übertragenen Wärmemenge beim Beladen eines Speichers mit dem optimierten Parametersatz

2.2.3 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)

Ziel des Arbeitspaketes ist die Entwicklung von Simulationsmodellen auf Basis von Energieflüssen zur Dimensionierung und wirtschaftlichen Bewertung des Betriebs des von den beteiligten Partnern entwickelten HP-ORC-Speicher-Systems. Seit dem 01.01.2017 ist mit den Fördermitteln für Personalkosten Herr Dr.-Ing. Peter Bazan als wissenschaftlicher Mitarbeiter zur Bearbeitung dieses Arbeitspaketes eingestellt. Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wird 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) betreut.

Die im Jahr 2018 begonnene Arbeit zur Abschätzung der Umweltverträglichkeit des Niedertemperatur-Speicher-Systems konnte in diesem Jahr abgeschlossen werden. 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.

Ein Teil der Ergebnisse wurden auf der IRES 2019 (International Renewable Energy Storage Conference) und zusätzlich auf der EnCN Jahreskonferenz 2019 präsentiert (s. Abschnitt „Veröffentlichungen“). Für das Jahr 2020 ist die Aufbereitung

und Publikation der Ergebnisse bezüglich der Integration des Speichersystems in einen Häuserverbund und der Verbindung mit PV/Wind und Geothermiestandorten geplant.

2.3.1 Life Cycle Assessment für die Bewertung des HP-ORC-Speicher-Systems

Die im Jahr 2018 begonnenen Analysen und Vergleiche des Life Cycle Assessments für Batterie- und Wärmespeichersysteme wurde im Jahr 2019 abgeschlossen. 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 Geothermiepotezialanalyse wurde ebenfalls die Umweltverträglichkeit von Bohrstationen für Geothermieranlagen untersucht. In Abhängigkeit des Standorts sowie der thermischen Anforderungen, kann über die notwendige Bohrtiefe das LCA erstellt werden.

2.3.2 Anpassung der Simulationsmodelle für die thermischen Komponenten

Die Entwicklung des Schichtenmodells für den Wärmespeicher wurde fertig gestellt und um den Abkühlungsvorgang gegenüber der Außentemperatur erweitert. 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. Die so weiterentwickelte Komponente wurde mit Simulationsmodellen für verschiedene Anwendungsfälle kombiniert.

2.3.3 Integration des Speichersystems in einen Häuserverbund

Für die kombinierte Dimensionierung und wirtschaftliche Bewertung der Integration eines kleinen Speichersystems (0,3 MWh bis 1,4 MWh) 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. Die Simulationen wurden für verschiedene Parameterkombinationen ausgeführt und unter der Berücksichtigung der von den Projektpartnern ermittelten Investitionskosten ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass mit den aktuellen Einspeisetarifen/Strompreisen, sowie Investitionskosten der Laboranlage, wenig rentable Einsatzmöglichkeiten bestehen. Aktuelle Trends zeigen allerdings, dass in den nächsten Jahren die Differenz zwischen Einspeisevergütung und Strompreis weiter ansteigt, wodurch in Kombination mit sinkenden Investitionskosten die Anzahl an rentablen Einsätzen deutlich gesteigert werden kann.

2.3.4 Untersuchung sehr großer Speicher auf Grundlastfähigkeit mit PV/Wind gekoppelt mit Geothermiestandorten

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 (Abbildung 9). 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 CO₂ Einsparpotentials durch Einsatz des Speichersystems.

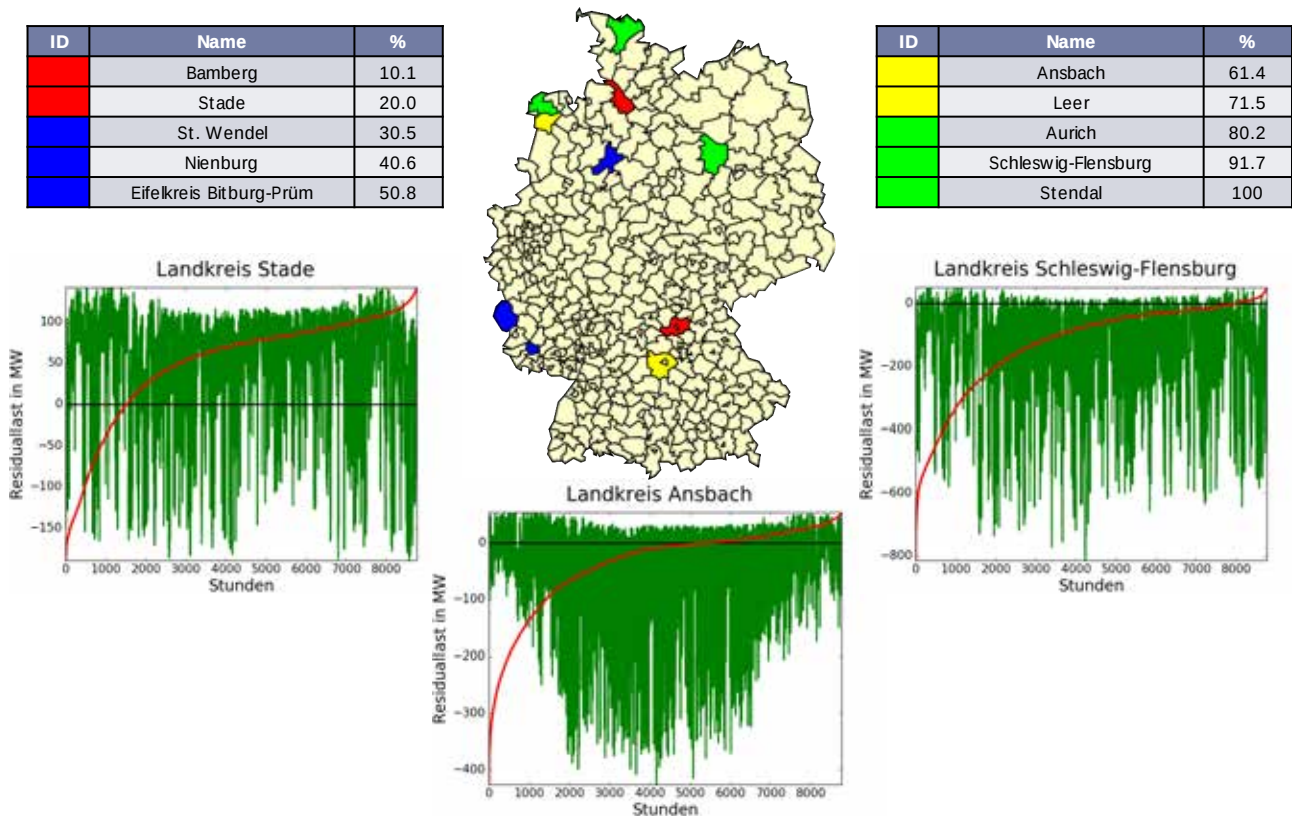


Abbildung 9: Darstellung der Residuallast auf Landkreisebene mit Identifikation der Landkreise mit einem hohen zeitlichen Anteil an Überschussstrom für die Wirtschaftlichkeitsanalyse großer Niedertemperaturspeicher

2.3.5 Untersuchung des Speichersystems in Verbindung mit einem Rechenzentrum

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 Abwärmepertemperaturen 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.

3 Spitzenlastfähige Hochtemperatur-Speicher (SP2)

3.1 Dynamische Speicherung von Überschussstrom in isothermen Heatpipe-Carbonatspeichern

Christoph Lange, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

3.1.1 Detail-Planung der Pilotanlage im 250 kWh Maßstab für das Speicherhaus

Im Laufe des Jahres 2019 wurde das innovative Konzept des Carbonatspeichers im Detail finalisiert und die Hauptkomponenten (Reaktor, Dampferzeuger, Gerüst, Schaltschrank) bestellt. Eine Lieferung der meisten Komponenten wird Anfang 2020 erfolgen, sodass sich die Inbetriebnahme voraussichtlich über die erste Jahreshälfte 2020 zieht.

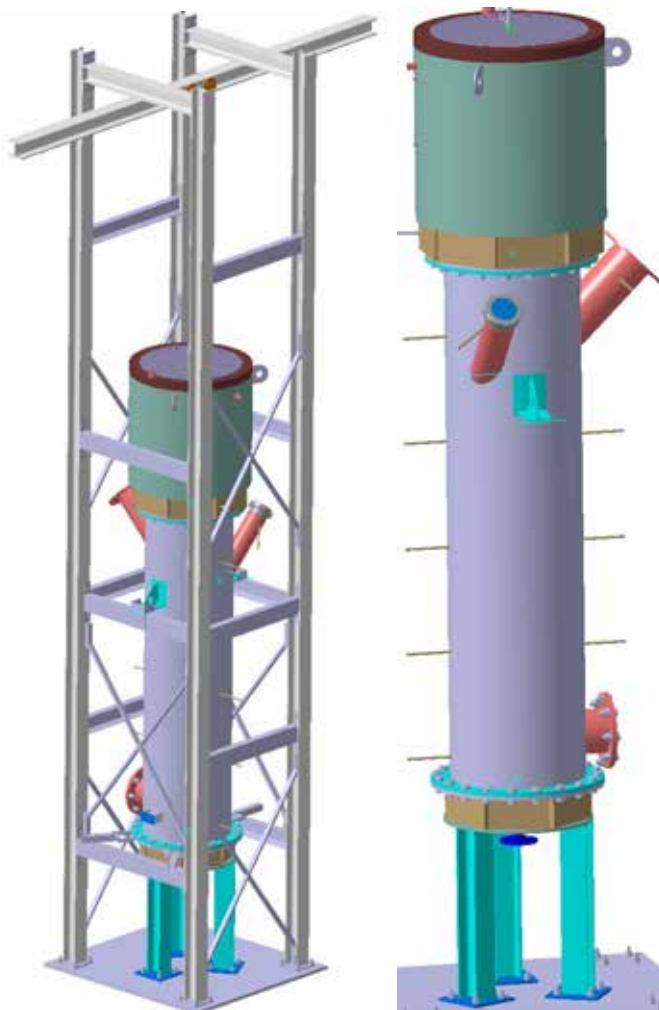


Abbildung 10: Finales Design der Pilotanlage des isothermen heatpipe-Carbonatspeichers

Besonderes Augenmerk soll hier auf die Lagerung des Reaktors und Dampferzeugers gelegt werden. Durch die bei bis zu 950°C zu erwartenden thermischen Dehnungen muss ein Längenwachstum des Reaktors von 4 cm und der heatpipes von ca. 5 cm berücksichtigt werden. Um die Kosten zu reduzieren wird eine hängende Lagerung des Reaktors nur im Kalten realisiert. Bei einer hängenden Lagerung im heißen Betrieb hätten deutlich höhere Materialstärken für die Hauptkomponente des Carbonatspeichers gewählt werden müssen, welche maßgeblich den Preis bestimmen. Um das Gewicht des Reaktors im Heißen aufzunehmen wurde ein Fuß mit Stahlring konstruiert, auf welchem das Reaktorgewicht lastet, sobald eine Reaktortemperatur von 300 °C überschritten wird und sich der Reaktorkörper entsprechend nach unten gedehnt hat (> 7 mm Dehnung). Um eine übermäßige thermische Beanspruchung der Fußkonstruktion durch Kontakt mit dem bis zu 900 °C heißen Reaktor zu vermeiden, wird dieser auf Schamottsteinen aufgesetzt, welche direkt auf dem Stahlring aufliegen.

Um eine vertikal gegenläufige Dehnung von hängendem Dampferzeuger und dem oberen Reaktorbereich bzw. den heatpipes zu vermeiden wurde auch die Lagerung des Dampferzeugers stehend geplant. Der Ring-Dampferzeuger steht damit wiederum auf einem Ring von Isoliersteinen, welche auf dem Reaktor-Deckel aufliegen.

3.1.2 Inbetriebnahme des Mini-Carbonatspeichers und erste Kalzinierungsversuche

Die Integration des kleinen Carbonatspeichers in den am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik im Jahr 2018 in Betrieb genommenen Heatpipe-Dampferzeuger-Teststand wurde erfolgreich durchgeführt. Die Versuchsanlage ist auf eine Leistungsübertragung durch die zentral geführte Heatpipe von 2,5 kW bei einer maximalen Speicherkapazität von 15 kWh ausgelegt, sodass innerhalb eines Versuchstages komplett kalziniert bzw. karboniert werden kann. Dies soll eine hohe Anzahl an Versuchen zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von isotherm geführten Carbonatspeichern ermöglichen. Das Dichtungskonzept ermöglicht den Austausch der Heatpipe, sodass auch optimierte Heatpipes im Vergleich getestet werden können. Das flexible Design ermöglicht durch die Entfernung des Deckel-Blindflansches und eine Umrüstung auf eine Kamin-Abzugshaube weiterhin die Durchführung von optischen Messungen zur Bestimmung von Wärmekapazitäten in Zusammenarbeit mit dem iMEET. Um die optischen Messungen mit Thermoelementsensorik direkt im Bett validieren zu können, wurden sogenannte Thermoelementrechen installiert, welche eine örtlich aufgelöste Temperaturmessung im radialen Abstand von der Heatpipe ermöglichen.

3.1.3 Fluidisierungsversuche

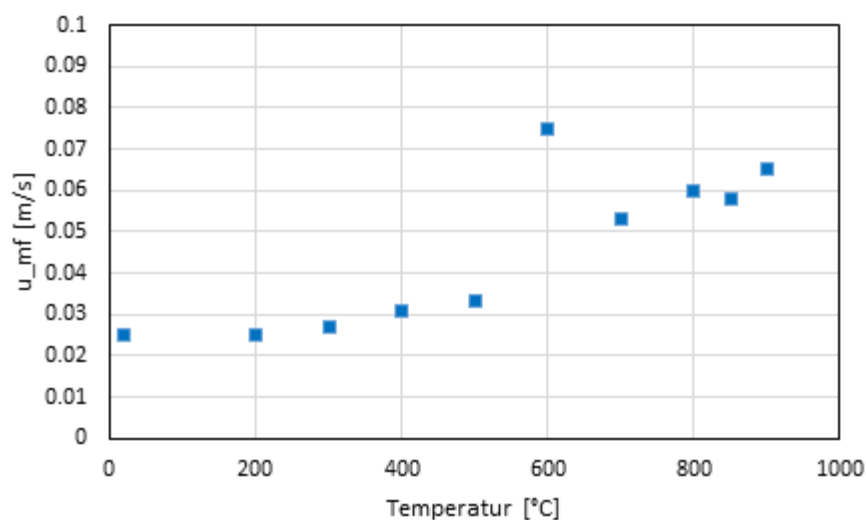


Abbildung 11: Lockerungspunkte einer 80cm hohen CaCO_3 Schüttung (Körnung 0,1-0,3mm) im Mini-Carbonatspeicher im Temperaturverlauf bei Durchströmung mit auf entsprechende Temperatur erhitzter Luft

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden ausführliche Fluidisierungsversuche durchgeführt. Bei den Voruntersuchungen an der TGA im Jahr 2018 hatte sich gezeigt, dass die feineren Kalksteinkörnungen der Firma Lhoist Rhein Kalk Germany bei großen Zyklenzahlen eine bessere Zyklens stabilität gegenüber größerem Material aufweisen. Daraufhin wurde die Kalksteinkörnung 0,1 - 0,3 mm ausgewählt für die Versuche.

Bei Fluidisierungsversuchen im Temperaturbereich von Umgebungsbedingungen bis 900 °C konnten Lockerungsgeschwindigkeiten ermittelt werden, die sowohl für den Kalzinierungs- und Karbonierungsbetrieb, als auch für die Regelung des Anfahrverhaltens des Carbonatspeichers entscheidend sind.

Im Diagramm ist die jeweils gemessene Lockerungsgeschwindigkeit von CaCO_3 unter Durchströmung mit Luft aufgetragen. Die angegebene Temperatur stellt dabei sowohl die Gastemperatur als auch die Betttemperatur dar. Bei Temperaturen ab 600 °C im Bett ist die Gastemperatur jedoch immer etwas geringer als die Betttemperatur, da die Gasvorwärmung bei kleinen Volumenströmen auf ca. 500 °C limitiert ist. Allerdings gleicht sich die Gastemperatur im Bett durch die Durchströmung sehr nah an die Betttemperatur an.

Der Verlauf der Lockerungspunkte über die Temperatur lässt einen Trend zu steigenden Lockerungsgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturen erkennen.

Während der Fluidisierungsversuche wurde festgestellt, dass die gelieferte Kalksteinkörnung durch eine sehr breite Partikelgrößenverteilung (0,01 bis 0,7 mm) zum einen sehr hohe Gasgeschwindigkeiten erfordert, andererseits aber auch einen hohen Partikelaustrag (großer Feinanteil) mit sich bringt. Das brachte auch die Gasregelstrecke an die Auslegungsgrenze, sodass für die Kalzinierungs-/Karbonierungsversuche eine Verengung des Kornbandes angestrebt wurde. Dazu wurde zuerst eine neue Fraktion gesiebt auf Partikelgrößen zwischen 0,09 und 0,355 mm, und weiterhin eine Körnung von Rhein Kalk bestellt, welche eine engere Verteilung besitzt.

Aufgrund zeitlicher Beschränkungen wurde von dem gesiebten Material vor Jahreswechsel nur eine Fluidisierungskurve bei 800 °C aufgenommen. Vergleicht man die Lockerungskurve des gesiebten Materials mit der des ursprünglichen Materials, fällt zunächst der deutlich schärfere Knick am Lockerungspunkt bei einer Gasgeschwindigkeit von 0,04 m/s auf. Das ist durch die enger begrenzte Partikelverteilung zu erklären. Der Lockerungspunkt des ursprünglichen Materials war mit 0,06 m/s deutlich größer.

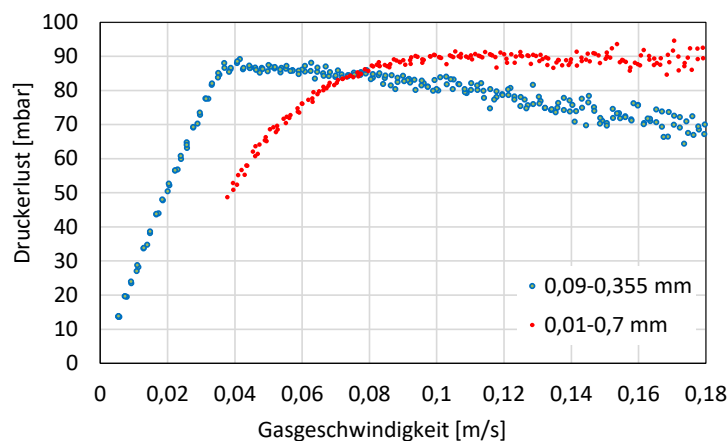


Abbildung 12: Fluidisierungskurven von Kalksteinkörnung gesiebt und ursprünglich bei 800 °C im Bett

Die engere Partikelgrößenverteilung erlaubt es die nötigen Gasgeschwindigkeiten zur Fluidisierung als auch den Partikelaustrag zu reduzieren. Durch die niedrigeren Lockerungsgeschwindigkeiten lässt sich nun auch eine breitere Palette an Fluidisierungszuständen am Mini-Carbonatspeicher realisieren.

3.1.4 Kalzinierung und Karbonierung

Die erste Kalzinierung noch mit dem alten Material wurde im Dezember durchgeführt. Der Reaktor war mit ca. 20 kg CaCO_3 gefüllt und die Kalzinierung wurde unter vollständiger Stickstoff-Fluidisierung (durchgängig $u/u_{mf} > 2$) des Bettmaterials bei Temperaturen von ca. 810 bis 850 °C durchgeführt. Durch die hohe Stickstoffzugabe von 50 NI/min führte die CO_2 -Freisetzung von bis zu 16,5 NI/min zu einem maximalen CO_2 -Partialdruck von 0,33 bar am Reaktoraustritt. In Abbildung 4 lässt sich gut nachvollziehen, wie die Reaktion immer rund 25 % unterhalb des Gleichgewichtspartialdrucks abläuft. Als die CO_2 -Freisetzung nachlässt sinkt der CO_2 -Partialdruck (2. Pfeil) bei nahezu konstanter Temperatur. Dadurch wird der Abstand zum Gleichgewicht erhöht und die Triebkräfte für die Reaktion wirken der nachlassenden CO_2 -Freisetzung entgegen. Als nahezu kein CO_2 mehr freigesetzt werden kann, steigt auch die Reaktortemperatur, da die vorgegebene Heizleistung jetzt nicht mehr in die endotherme Reaktion, sondern in die Aufheizung des Bettmaterials fließt.

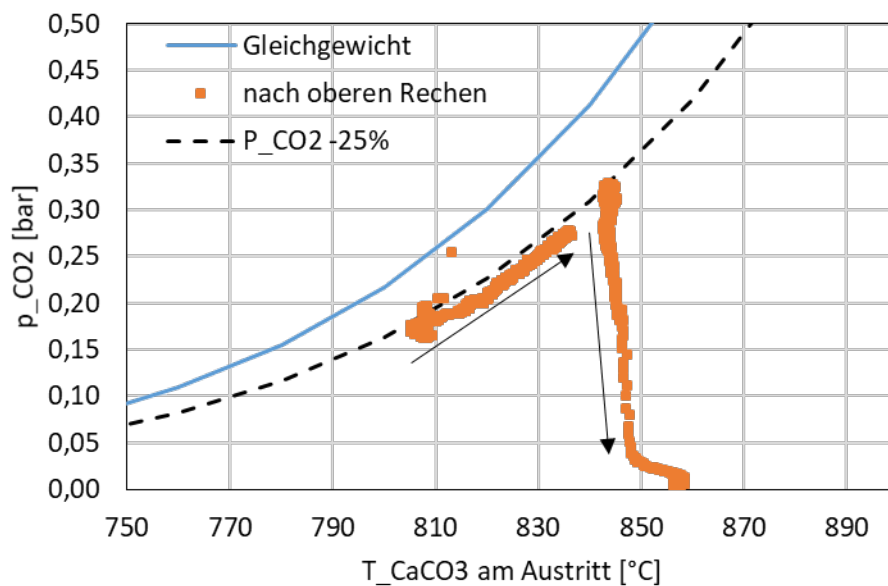


Abbildung 13: Position von CO_2 -Partialdruck und Temperatur am Reaktoraustritt im Vergleich zum Reaktionsgleichgewicht des CaCO_3 - CO_2 - CaO Systems

Innerhalb von 2:25 h wurden ca. 4,5 kg CO_2 aus dem CaCO_3 freigesetzt, was einer aufgenommenen Reaktionswärme von ca. 5,1 kWh entspricht. Der CO_2 -Partialdruck am Gasauslass des Reaktors betrug zwischen 25 und 30 %, was einer aufgenommenen Reaktionswärmeleistung von maximal 3 kW entspricht. Nach ca. 2,5 h Kalzinierung reduzierte sich die Menge an freigesetztem CO_2 deutlich und die Reaktortemperaturen stiegen stark an, was durch die temperaturgeführte Regelung der elektrischen Beheizung bedingt war. (Der Einbruch in der Grafik ist durch eine Unterbrechung der Messwertaufzeichnung entstanden.)

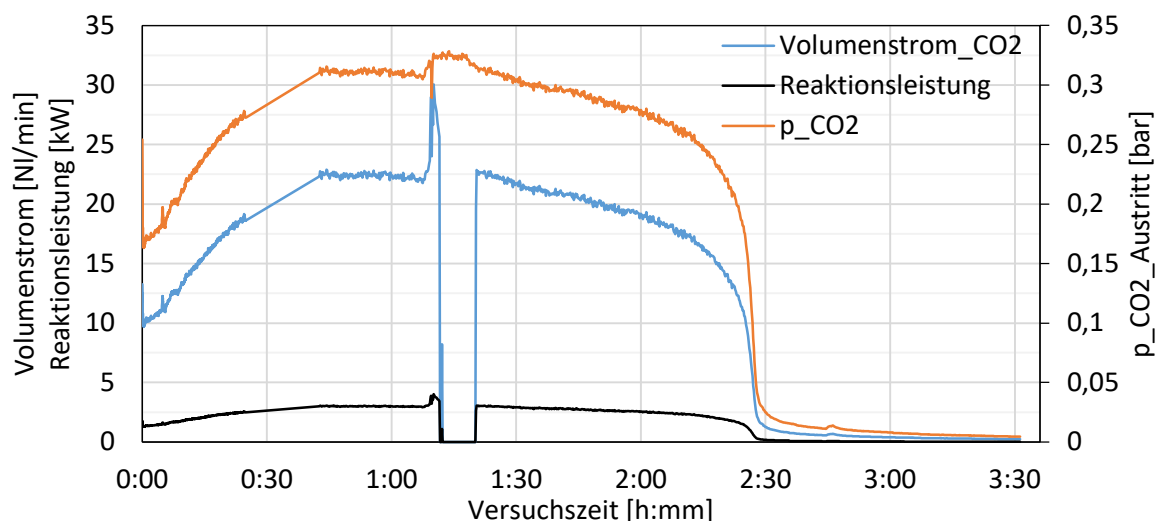


Abbildung 14: freigesetzter CO_2 -Volumenstrom bei der Kalzinierung mit aufgenommener Reaktionsleistung und CO_2 -Partialdruck

Im Anschluss an die Kalzinierung soll das CaO wieder karboniert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Fluidisierung im Reaktor gegeben ist. Die Fluidisierung erhöht die Wärmeübergangskoeffizienten im Reaktor, sodass der Wärmetransport zur Heatpipe und damit zum Dampferzeuger gewährleistet wird. Da bei der Karbonierung ein großer Teil des CO_2 nicht mehr am oberen Ende der Schüttung ankommt, muss die verbleibende Gasmenge ausreichende Fluidisierungsgeschwindigkeiten erzielen. Aus diesem Grund wird das CO_2 teilweise mit Stickstoff verdünnt, da dieser nicht durch das Bettmaterial absorbiert wird. Durch die Integration des Mini-Carbonatspeichers in den Heatpipe-Dampferzeuger-Teststand kann nun mit der entstandenen Reaktionswärme Dampf im 2-3 Kilowatt Maßstab produziert werden, um die Anwendung zu demonstrieren.

In Kooperation mit dem iMEET werden im Jahr 2020 erste optische Temperaturmessungen am Mini-Carbonatspeicher durchgeführt, welcher im Dezember 2019 vollständig in Betrieb genommen wurde.

3.1.5 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 CO₂ aus dem Rauchgas von Kraftwerken benutzt wurde. Die zyklische Karbonierung (CO₂-Abscheidung) und Kalzinierung (Regeneration des Sorbents) wurde in enger Kooperation mit der TU Darmstadt vorangetrieben, wo eine 300 kW_{th} 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 CO₂-Abscheidung in der Zementproduktion beschäftigt. Dieses Projekt baut auf die Erfahrung und Ergebnisse von CARINA und diesem Teilprojekt im EnCN. Am EVT wird dabei ab 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

Frank Fecher, Andres Osvet, Christoph Brabec (iMEET/ZAE)

3.2.1 Thermographische Phosphoren

Die Untersuchung von Mn⁴⁺-dotierten Magnesium-Fluorgermanat-Leuchtstoffen (Mg₂₈Ge_{7.5}O₃₈F₁₀) wurde abgeschlossen. Dieses Material hat eine effiziente Lumineszenz auch bei hohen Temperaturen, es ist sowohl für die Intensity-ratio als auch für die zeitaufgelöste Lumineszenz-Thermometrie geeignet, aber es ist auch empfindlich für die Synthesebedingungen. Wir haben festgestellt, dass die Feuchtigkeit der Umgebungsatmosphäre (die für die Umwandlung der Mn-Ionen in den 4+ - Zustand notwendig ist) eine wichtige Rolle spielt. Durch eine genaue Kontrolle der Feuchtigkeit während der Festkörpersynthese und die Durchführung von Struktur- (XRD) und Spektralanalysen haben wir festgestellt, dass MgF₂ (Flussmittel bei der Synthese) in MgO umgewandelt wird, wenn Wasserdampf vorhanden ist, was zur Bildung verschiedener Verbindungen führt und die Lumineszenzeffizienz erheblich verringert.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik wurden thermographische Hochtemperatur-Leuchtstoffe untersucht. Ein Vergleich von Gadolinium-Aluminium-Perowskit GdAlO₃ und Gadolinium-Aluminium-Granat Gd₃Al₅O₁₂ wurde durchgeführt, um herauszufinden, welches Material ein besserer Wirtskristall für die Dysprosiumionen (Dy³⁺) ist. Die Intensity-ratio Methode kann über einen breiten Temperaturbereich bis 1600 K im Falle der Granate und 1200 K für Perowskite verwendet werden. Die Lumineszenzzerfallszeit als Maß für die Temperatur hat eine höhere Empfindlichkeit, aber einen engeren nutzbaren Bereich (1200 - 1600 K für Granate und 700 - 1000 K für Perowskite). Es wurde festgestellt, dass ein teilweiser Ersatz von Gd durch Lutetiumionen resultiert führt zu höherer Lumineszenzeffizienz und erweitert den nutzbaren Temperaturmessbereich [1].

Ein weiterer seltenerd-dotierter thermographischer Phosphor, (Sr,Ca)SiAlN₃:Eu²⁺, hat ein breites Anregungsspektrum, eine relative Empfindlichkeit ähnlich der von Yttrium-Aluminium-Granat und einen schnellen Lumineszenzzerfall. Der Messbereich ist jedoch auf 800 K begrenzt. Ein weiterer Nachteil dieser Nitridverbindung ist, dass die Lumineszenzeigenschaften von der Größe, der Morphologie und der Art der Anwendung abhängig sind. Dies erfordert genaue Kalibrierungsverfahren.

3.2.2 Wärmetransport im CaCO₃-Behälter.

Unter Anwendung der Comsol Multiphysics-Software wurde ein Modell des Wärmetransports und der Temperaturverteilung um eine Heatpipe herum erstellt.

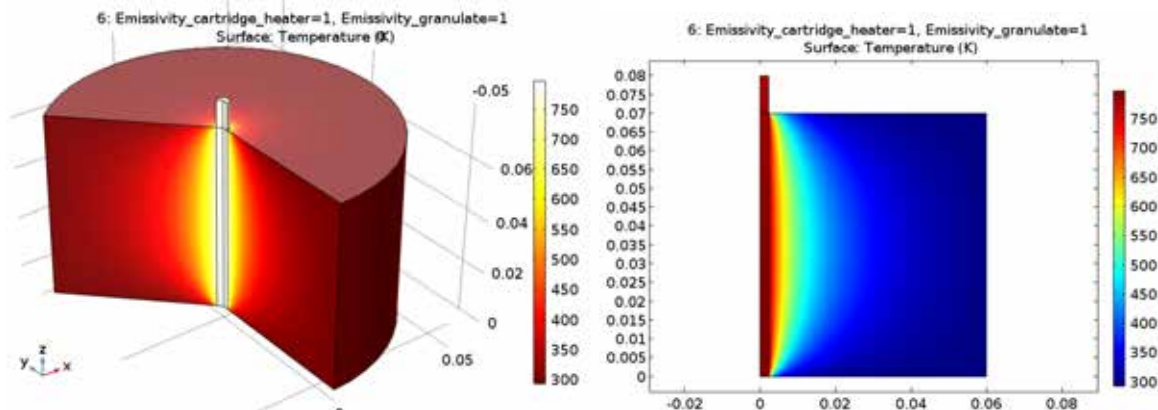


Abbildung 15: Modell des Wärmetransports um eine Heatpipe, erstellt in Comsol Multiphysics.

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

Jan Sebastian Hildebrand, Wolfgang Krcmar (THN)

3.3.1 Einleitung

In diesem Teilprojekt wird u.a. die Struktur keramischer Baustoffe als thermische Speichermassen mithilfe von Finite-Elemente-Simulationen für instationäre Aufheiz- und Abkühlprozesse optimiert. Das vorrangige Ziel besteht darin, durch Variation der Formstein-Geometrie die bei Wärmespeichervorgängen resultierenden thermischen Spannungen zu minimieren, um die Zyklenstabilität der Speichermassen zu erhöhen. Um die Ergebnisse der Simulationen zu überprüfen, werden die als thermische Massen fungierenden Formsteine mit optimierter Geometrie in einem Prüfstand zyklisch aufgeheizt und mit Wasser abgeschreckt. Die mit dieser Vorgehensweise geometrisch optimierten Formsteine sollen als Speichermassen für die Direktkontakt-Dampfverzeugung eingesetzt werden.

3.3.2 Finite-Elemente-Simulation: Variation der Formstein-Geometrie

In einer ersten Variation der Geometrie wird bei gleichbleibender Stegbreite b und Extrusionslänge h das Volumen durch Verändern der Kantenlänge A variiert und danach bei konstanter Stegbreite b und konstanter Kantenlänge A die Extrusionslänge h verringert (Abbildung 16, links). In einer weiteren geometrischen Variation wird bei konstant bleibendem Volumen V und konstanter Extrusionslänge h die Stegbreite b variiert und dann analog zur ersten Variation bei konstantem Volumen V und konstanter Stegbreite b die Extrusionslänge h variiert (Abbildung 16, rechts).

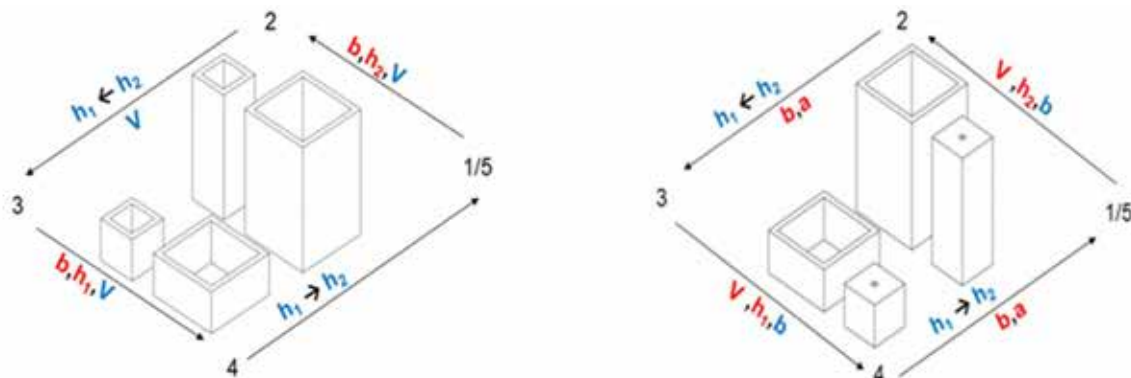


Abbildung 16: Geometrische Variationen über Veränderung der Kantenlänge A und Veränderung der Extrusionslänge h (links) und über Veränderung der Stegbreite b und Veränderung der Extrusionslänge h (rechts).

Mit dem FEM-Programm „ANSYS“ wird das Abschrecken der keramischen Körper mit einer Temperatur von 520 °C in einem Wasserbad der Temperatur 20 °C simuliert. Dabei wird das transiente Temperaturprofil über das gesamte Körpervolumen mittels der FEM-Software „Fluent“ für die ersten 25 Sekunden berechnet. Anschließend werden mittels der FEM-Software „Transiente Strukturmechanik“ die aus dem Temperaturprofil resultierenden thermischen Zugspannungen über denselben Zeitraum abgeleitet. Die Veränderung der Kantenlänge A führt in einen Fall (3 → 4) zu einem deutlichen Einfluss und im anderen Fall (1 → 2) zu einem geringen Einfluss auf die resultierenden Zugspannungen des Formsteins. Gleiches gilt für die Veränderung der Extrusionslänge h, die in einem Fall (2 → 3) starke Auswirkung zeigt und bei anderer Ausgangsgeometrie (4 → 5) nur eine geringe Auswirkung auf die thermischen Zugspannungen ausübt. Bei geringerer Extrusionslänge h ist die Auswirkung der Kantenlänge A stark und entsprechend umgekehrt bei großer Extrusionslänge h schwach ausgeprägt.

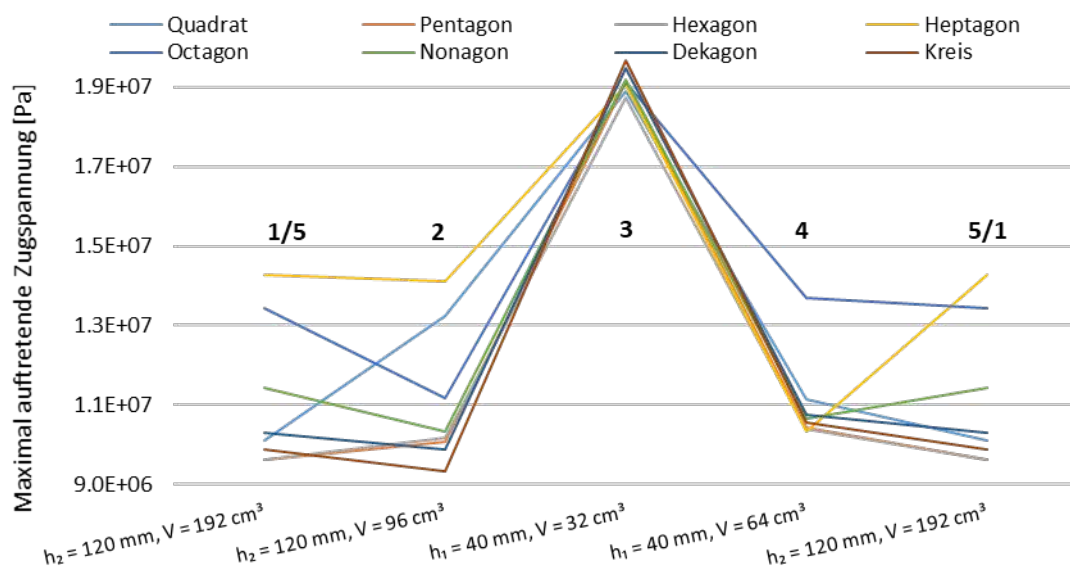


Abbildung 17: Maximale thermische Zugspannungen beim Abschrecken in Abhängigkeit geometrischer Parameter Kantenlänge A und Extrusionslänge h und der geometrischen Grundfläche, die zur Extrusion des Hohlkörpers dient.

Bei den weiteren Simulationen wird der Einfluss der Stegbreite b auf die resultierenden Zugspannungen am deutlichsten (Abbildung 18).

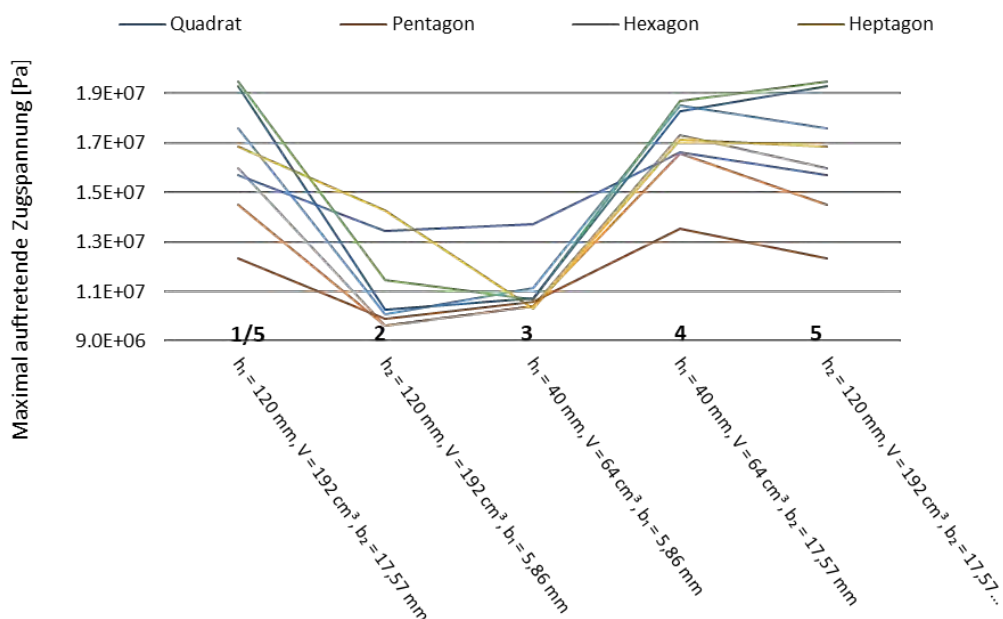


Abbildung 18: Maximale thermische Zugspannungen beim Abschrecken in Abhängigkeit der geometrischen Parameter Stegbreite b und Extrusionslänge h und der geometrischen Grundfläche, die zur Extrusion des Hohlkörpers dient.

Ebenso gilt bei geringer Kantenlänge A eine starke Abhängigkeit der resultierenden Spannungen von der Extrusionslänge h und umgekehrt. Daraus resultiert ein möglicher funktioneller Zusammenhang zwischen Kantenlänge A und der Extrusionslänge h. So 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 resultierenden thermischen Zugspannungen besonders niedrig (Abbildung 17).

3.3.3 Simultane thermische Analyse einer Mauerziegel-Probe als thermische Speichermasse

Pulverförmige, bis zur Massenkonstanz getrocknete Proben eines kommerziell erhältlichen Planziegels vom Typ „ISO-Plan-Objekt 0,12 Thermopor“ (Zulassungsnummer Z-17.1.977) werden mittels simultaner thermischer Analyse (STA) an einem Gerät vom Typ „STA 449 F3 Jupiter“ der Firma Netzsch verschiedenen, zyklischen Temperaturprofilen (250 °C/450 °C, 300 °C/500 °C, 350 °C/550 °C, 450 °C/650 °C und 550 °C/750 °C) unterworfen.

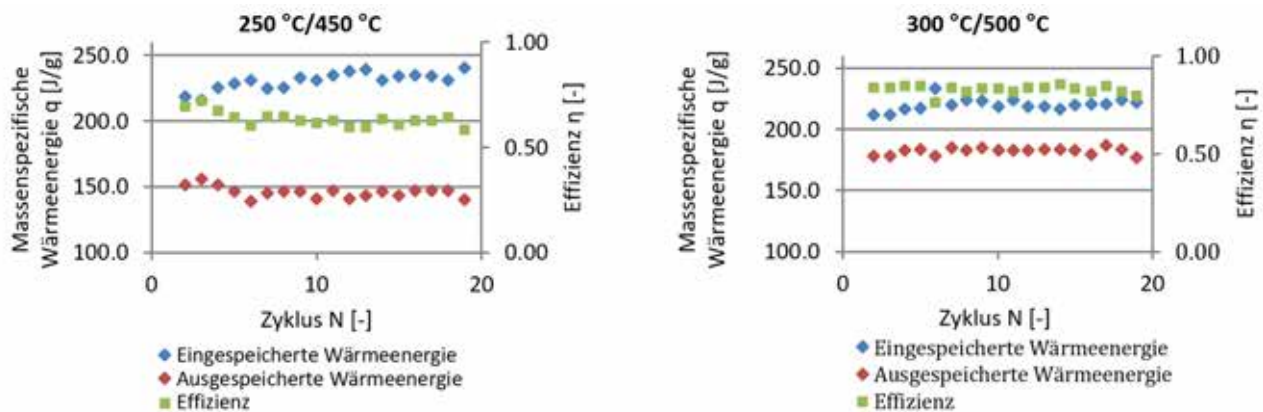


Abbildung 19: Eingespeicherte und ausgespeicherte Wärmeenergien und die daraus resultierende Effizienz bei zyklischen Temperaturwechseln.

Dabei beträgt die Temperaturdifferenz jeweils 200 K. Mit den Versuchen soll geprüft werden, ob sich der Betrag der ein- und ausspeicherbaren massenspezifischen Wärmeenergien sowie das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Wärmeenergie (=Effizienz η) mit der Zykluszahl N verändert (Abbildung 19). Da die keramischen Speichermassen während der Versuchsdurchführungen mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in Kontakt kommen, werden alle STA-Messungen unter synthetischer Luft (80 Vol.-% N_2 , 20 Vol.-% O_2) mit einem Volumenstrom von 250 ml/min durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei dem hier betrachteten Werkstoff Ziegelkeramik, die Fähigkeit Wärmeenergie effektiv zu speichern mit zunehmendem Temperaturniveau erhöht. Die Verbesserung der Wärmespeicherfähigkeit steigt nicht linear und unbegrenzt, sondern strebt einem Sättigungswert entgegen (Abbildung 20).

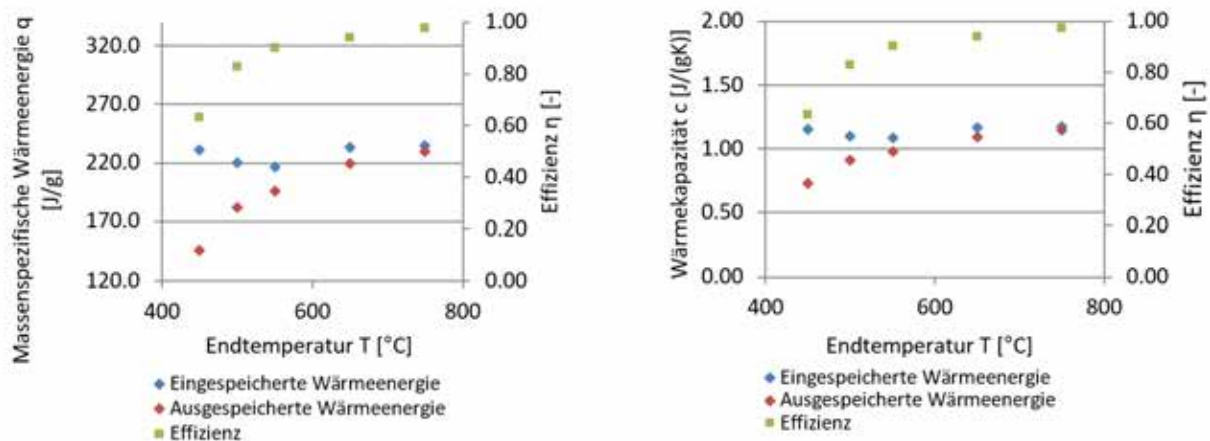


Abbildung 20: Mittelwerte ein- und ausgespeicherter Wärmeenergien sowie daraus berechneter Effizienz-Werte (links) sowie Umrechnung auf die Wärmekapazitäten für den Einspeicher- und den zugehörigen Ausspeichervorgang in Abhängigkeit von der jeweils gewählten Endtemperatur.

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten der keramischen Speichermassen kann das Dulong-Petit-Gesetz geben, nach dem Feststoffe mit zunehmender Temperatur eine molare Wärmekapazität von $3R$ anstreben. Es zeigt sich bei allen betrachteten Messgrößen keine deutliche Abhängigkeit von der Zyklenzahl N .

3.3.4 Prüfstand für thermische Speichermassen

Im Prüfstand (Abbildung 21) werden innerhalb eines Druckbehälters keramische Formkörper als Speichermassen (Ziegelkeramik) für die thermische Energiespeicherung eingesetzt und durch die Ein- und Ausspeicherung von thermischer Energie zyklisch beansprucht.



Abbildung 21: Neu gebauter Prüfstand zur zyklischen thermischen Beanspruchung von Wärmespeichermassen.

Der Probekörper, ein kommerziell erhältlicher Planziegel vom Typ „ISO-Plan-Objekt 0,12 Thermopor“, wird dazu mit einer elektrischen Strahlungsheizung auf bis zu 750 °C erhitzt und anschließend mit einer über eine Dosierpumpe regelbaren Düse mit fein zerstäubtem VE-Wasser zur Direktdampferzeugung besprüht. Ab einem

Auslassdruck von 2 bar wird der erzeugte Wasserdampf über den Dampfauslass in die Abluft überführt. In den bisher durchgeführten Versuchen wurden die Ziegel auf eine Temperatur von 450 °C , 500 °C und 550 °C erhitzt und anschließend mit VE-Wasser mit einem Volumenstrom von 25 l/h zur Dampferzeugung abgeschreckt auf eine jeweils um 200 K niedrigere Temperatur. Analog zur Simultanen Thermischen Analyse wurden aus den gemessenen Daten die gemittelten Ergebnisse der ausgespeicherten und eingespeicherten Energien sowie der daraus resultierenden Effizienzen in Abhängigkeit von der Endtemperatur aufgetragen (Abbildung 22).

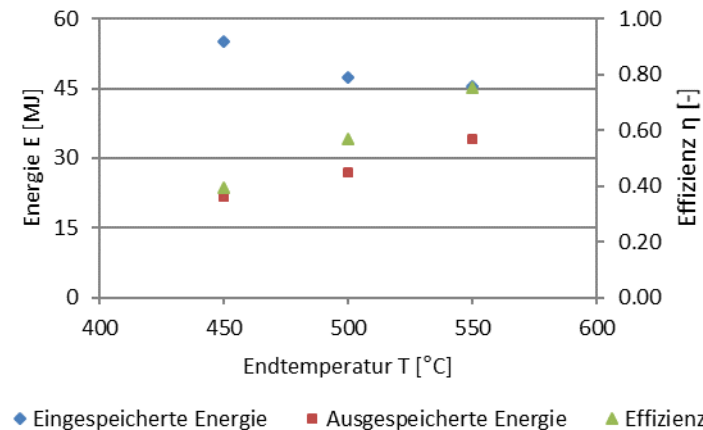


Abbildung 22: Abschreckversuche mit dem neuen Prüfstand; Mittelwerte der jeweils aus- und eingespeicherten Wärmeenergien sowie daraus berechnete Effizienz-Werte in Abhängigkeit von der Endtemperatur.

Aus den Abschreckversuchen geht hervor, dass sich das Energieniveau beim Ausspeichern mit zunehmender Temperatur erhöht. Damit bestätigen die Ergebnisse aus den Abschreckversuchen die aus der Simultanen thermischen Analyse (STA) erzielten Ergebnisse für das gleiche Wärmespeichermaterial. Mit steigendem Temperaturniveau der Anwendung erhöht sich die Differenz zwischen Ofenraumtemperatur und Außenraumtemperatur. Da die Temperaturdifferenz die Triebkraft für den Wärmestrom ist, wird mit zunehmendem Temperaturniveau der Anspruch an die Wärmeisolation des Ofens höher. Eine ideale Wärmeisolation ist nicht möglich, weshalb bei höheren Temperaturen Abwärmeverluste deutlicher zum Tragen kommen. Dazu trägt auch der Anstieg des Strahlungsanteils an der Wärmeübertragung bei, der mit zunehmender Temperatur wächst, d.h. bei höheren Temperaturniveaus im Vergleich zur Umgebungstemperatur, steigt auch deutlich der Anteil der abgestrahlten Wärme. Materialeitig betrachtet wird die Anwendung sensibler Wärmespeicher bei höheren Temperaturen, bis zum Sättigungsbereich, effektiver. In einer realen technischen Anwendung, muss ein Kompromiss zwischen der Effizienz des Materials und der Güte der Wärmeisolation bei der Wahl des Temperaturbereichs getroffen werden, damit ein technisch und wirtschaftlich sinnvoller Betrieb des Gesamtsystems gewährleistet werden kann.

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

Im Teilprojekt SP3 arbeiten der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik und der Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik zusammen an Technologien, die eine hohe Dynamik in Power-to-X Prozessen erlauben. Dies geschieht sowohl auf mikroskopischer Ebene im Rahmen von Katalysatorentwicklung, als auch auf Systemebene in Rahmen der experimentellen Untersuchung eines neuartigen Reaktorkonzeptes und transienten Simulationen.

4.1 Reaktorkonzept für dynamische Methanisierung

Michael Neubert, Jürgen Karl (EVT)

4.1.1 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik wurde in den letzten Jahren ein neuartiges Reaktorkonzept entwickelt, das sich für die Kühlung von stark exothermen Synthesen eignet, wobei sich die bisherigen experimentellen Untersuchungen auf die Methanisierung konzentrierten. Die eigentliche Innovation stellen dabei ‚heatpipes‘ (dt. Wärmerohre) dar, die sehr hohe lokale Wärmestromdichten für die in-situ Kühlung erlauben und gleichzeitig als passive Bauteile die Komplexität des Reaktors gering halten. Das grundsätzliche Konzept, sowie die Ausführung als 5 kW Prototyp wurden bereits im Jahresbericht 2017 vorgestellt. Die experimentelle Charakterisierung für H_2/CO_2 Gemische zur SNG Herstellung standen im Jahresbericht 2018 im Fokus. Im Folgenden soll der aktuelle Stand für die Weiterentwicklung für eine höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig reduziertem Material- und Produktionsaufwand diskutiert werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Veröffentlichung² und den ‚i3upgrade‘ Projektergebnissen zeigen sich zwei ausgeprägte Zonen im axialen Temperaturverlauf im Reaktionskanal des Laborreaktors:

- Die **Hauptreaktionszone** am Gaseintritt (unten) ist durch eine sehr hohe Synthesetemperatur geprägt, die nah am Katalysatorlimit von 550°C liegt und aus einem hohen Eduktumsatz resultiert. Dabei ist die Wärmefreisetzung größer als die radial abgeführte Wärme, was wiederum zu einem nahezu schlagartigen Temperaturanstieg direkt am Gaseinlass führt. Je nach Eduktgasvolumenstrom ergibt sich ein mehr oder weniger ausgeprägter Bereich mit maximaler Synthesetemperatur (‘Hot Spot’). Im Bereich des ‚Hot Spots‘ entspricht die Wärmefreisetzung in etwa der radialen Wärmeabfuhr, wobei die Temperaturen von ~550°C bereits einen gleichgewichtslimitierenden Effekt haben und damit die lokale Wärmefreisetzung reduzieren.
- Die **Nachreaktionszone** schließt sich axial an die Hauptreaktionszone an und erstreckt sich bis zum Gasaustritt (oben). Der (nahezu linear) fallende Temperaturverlauf verdeutlicht, dass die radiale Wärmeabfuhr in diesem Bereich größer ist als Wärmeproduktion durch die Reaktion auf Grund der Gleichgewichtsverschiebung. Eine detaillierte Analyse der experimentellen Ergebnisse legt den Schluss nahe, dass ab der Unterschreitung eines gewissen Temperaturlevels (~350-400°C) im Zentrum eines Reaktionskanals der Eduktumsatz praktisch zum Erliegen kommt und ein reiner Kühleffekt zu beobachten ist. Dabei ist von wesentlicher Bedeutung, dass die querschnittsgemittelte Temperatur an einer bestimmten axialen Position deutlich niedriger ist, als die gemessene in der Kanalmitte.

Ziel muss es sein, den Anteil der Nachreaktionszone am gesamten Reaktionskanal zu verkleinern, was insbesondere eine Erhöhung des durchschnittlichen Temperaturniveaus erfordert um die Reaktionsgeschwindigkeit auf einem hohen Niveau zu halten und gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit zu verlangsamen um mögliche Stofftransportlimitierungen zu verringern. Das überarbeitete Konzept mit höherer Leistungsdichte enthält deshalb als wesentliche Innovation einen konischen Reaktionskanal, der eine Verbreiterung des Querschnitts Richtung Gasaustritt

² 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. 229 (2018) 289–298. doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.

(= höhere Kerntemperatur in der Schüttung) und damit Verlangsamung der Strömungsgeschwindigkeit (= Reduktion von Stofftransportlimitierung) zur Folge hat. Die folgende Abbildung 23 zeigt ein CAD Schema dieser Einheitszelle.

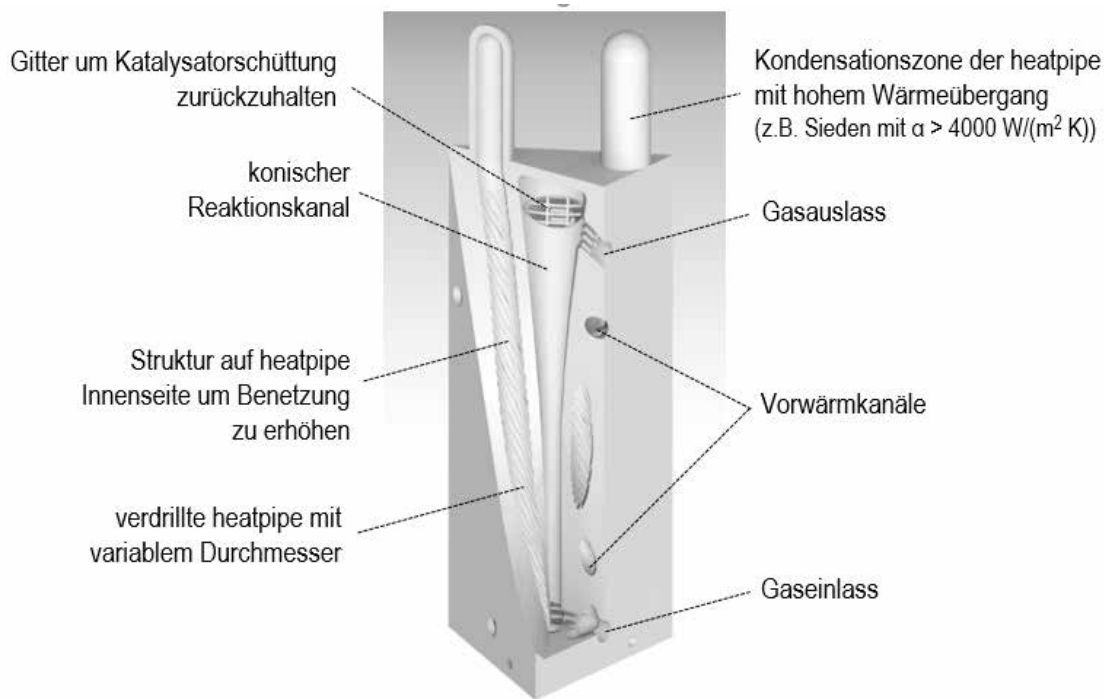


Abbildung 23: Konzept für Einheitszelle eines heatpipe gekühlten Methanisierungsreaktors mit erhöhter Leistungsdichte

Die folgende Tabelle 1 vergleicht einige Randgrößen des bisher realisierten Laborreaktors und des momentan in Entwicklung befindlichen Konzeptes. Hierbei wird deutlich, dass das überarbeitete Konzept ~60 % Materialeinsparung erlauben würde. Gleichzeitig ermöglicht die additive Fertigung die Integration weiterer Funktionalitäten (z.B. Gitter für die Fixierung der Katalysatorschüttung), die sonst separate Fertigungsschritte notwendig machen würden.

Tabelle 1: Vergleich von Kerndaten von Labor-Prototyp (5 kW) und Einheitszelle von Konzept mit höheren Leistungsdichte für up-scale

	5 kW Prototyp	Konzept mit erhöhter Leistungsdichte
Masse pro kW	5 kg/kW	2 kg/kW
heatpipes pro Reaktionskanal	1	4
Leistung pro Reaktionskanal	0.6 kW/Kanal	6 kW/Kanal
Anteil durchströmte Querschnittsfläche	19 %	42 %
Lokale Leerrohrgeschwindigkeit am Gaseintritt	0.8 m/s	9 m/s
Lokale Leerrohrgeschwindigkeit am Gasaustritt (bei Umsatz von 80 %)	0.5 m/s	0.4 m/s

Für eine enge Abstimmung innerhalb des Teilprojekts ‚Dynamische Synthesen‘ fanden regelmäßige Treffen mit den Kollegen vom Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) statt um detailliert Zwischenergebnisse und das weitere Vorgehen zu diskutieren. Außerdem wurde der aktuelle Stand der Arbeiten in einer gemeinsamen Präsentation auf der Jahreskonferenz des Energie Campus Nürnberg präsentiert. Des Weiteren erfolgte die Präsentation des heatpipe gekühlten Laborreaktors und die damit erzielten Ergebnisse auf der DGMK Fachtagung ‚Thermochemische Konversion – Schlüsselbaustein für zukünftige Energie- und Rohstoffsysteme‘ im Mai 2019 in Dresden.

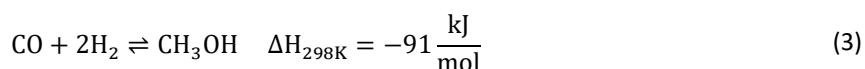
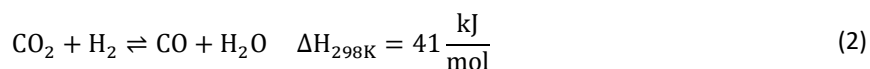
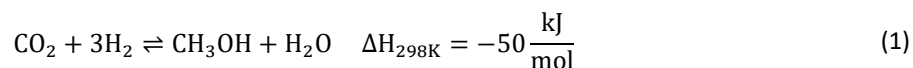
Im Jahr 2020 soll die Fertigung und Inbetriebnahme des überarbeiteten Konzeptes mit erhöhter Leistungsdichte erfolgen. Außerdem soll eine im Rahmen des Drittmittelprojekts ‚i3upgrade‘ entwickelte Methodik zur Reaktorcharakterisierung bei dynamischen (Sprung-)Bedingungen auch mit reinen H_2/CO_2 Gemischen durchgeführt werden. Das erwähnte EU Projekt ‚i3upgrade‘, welches sich mit der Synthese von Kuppelgasen aus der Stahlproduktion beschäftigt, koordiniert der

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik bereits seit Juni 2018. Des Weiteren konnten zwei weitere Forschungsprojekte akquiriert werden, die das innovative heatpipe gekühlte Reaktorkonzept anwenden und dessen Entwicklung weiterführen. Zum Einen handelt es sich dabei um das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt ‚Power-to-Biogas‘, das die Methanisierung von Biogasgemischen in einer Demonstrationsanlage an einer industriellen Biomethananlagen (TRL 5-6) untersucht. Für diese regenerative SNG Produktion werden Techniken aus dem Bereich ‚machine learning‘ angewandt um eine wirtschaftlich günstige Betriebsweise sicherzustellen. Zum Anderen untersucht das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderte Projekt ‚FlexBiomethane‘ die Teilmethanisierung von Biogas zur Vor-Ort-Speicherung in der Fermenterhülle. Dieses Konzept adressiert die zahlreichen kleinen Biogasanlagen in Deutschland (< 1 MW_{el}) um lokale Stromspeicherkonzepte über Power-to-Gas realisieren zu können. Zusätzlich wurde eine vom Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik eingereichte Projektskizze zur wasserstoffintensivierten Methanisierung von Klärgas am Standort der Kläranlage Nürnberg vom BMWi zur Vollantragsstellung aufgefordert. Allen drei vorgestellten Projekten liegt der im EnCN entwickelte heatpipe gekühlte Reaktor für die Methanisierung zu Grunde, der die Umsetzung von stöchiometrischen Gasgemischen bei gleichzeitig geringer Komplexität erlaubt.

4.2 Katalysatorentwicklung für die instationäre Methanolsynthese

Patrick Schühle, Peter Wasserscheid, Jakob Albert (CRT)

Eine Möglichkeit in der Speicherung von überschüssiger elektrischer Energie bietet das Power-to-Liquid Prinzip zur Synthese von Methanol. Hierbei wird elektrolytisch erzeugter Wasserstoff (H₂) mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu Methanol (CH₃OH) umgesetzt. Dadurch ist nicht nur die Speicherung elektrischer Energie möglich, sondern auch die Umwandlung des klimaschädlichen Treibhausgases CO₂ in ein Wertprodukt, welches Anwendung in der Stromerzeugung, der Industrie und im Verkehrssektor finden kann. Die industriell etablierte Synthese von Methanol erfolgt durch die Umsetzung von fossil gewonnenem Synthesegas (H₂ und Gemisch aus CO und CO₂) unter Einsatz von heterogenen Cu/ZnO/Al₂O₃-Katalysatoren, wobei die folgenden Reaktionen ablaufen:



Als Nebenreaktion zur exothermen Methanolsynthese aus CO₂ (1) und CO (3) läuft die Reverse-Water-Gas-Shift Reaktion (RWGS, 2) ab. Jedoch zeigt der Cu-basierte Katalysator in der Hydrierung von CO₂ zu Methanol ein Deaktivierungsverhalten, wodurch die Entwicklung alternativer Katalysatoren in den Fokus rückt. In der Literatur wurden erste interessante Untersuchungen mit einem In₂O₃/ZrO₂-Katalysator durchgeführt und als Alternative zum Cu-System vorgeschlagen.

Zu diesem Zweck wurden in den Jahren 2017 und 2018 bereits zwei chemische Anlagen (Rührkesselreaktor und kontinuierlich betriebener Festbettreaktor) am Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik in Betrieb genommen. Im Rührkesselreaktor folgten im Jahr 2019 reaktionstechnische Untersuchungen des neuen Indium-Katalysators in einem neuartigen Slurry-Verfahren. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass die am Lehrstuhl hergestellten In₂O₃/ZrO₂-Katalysatoren in einer thermostabilen Trägerflüssigkeit (z.B. aliphatisches oder aromatisches Mineralöl) suspendiert vorliegen. Die gasförmigen Reaktanden werden in der Trägerflüssigkeit eingelöst und so mit der Katalysatoroberfläche in Kontakt gebracht. Neben der Untersuchung optimaler Reaktionsbedingungen (z.B. Temperatur, Druck, Rührerdrehzahl) im Slurrykonzept fokussierten sich die Forschungsvorhaben auf den Einfluss des Katalysatorträgers auf die Aktivität. Dazu wurden die Katalysatoren in Kooperation mit dem „Lehrstuhl für Technische Chemie I“ der „Universität Duisburg-Essen“ (Prof. Barcikowski) unter Verwendung analytischer Methoden, u.A. „CO₂-Temperaturprogrammierte Desorption (CO₂-TPD)“, H₂-Temperaturprogrammierte Reduktion (H₂-TPR)“, „Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)“ und „Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)“ untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine hohe Methanolproduktivität mit ZrO₂ als Katalysatorträger erreicht wurde, weil dieser zum einen in hohem Maße das Edukt CO₂ bindet und zum anderen die Bildung der aktiven Katalysatorspezies In(OH)_x auf dessen Oberfläche fördert. Weiterhin konnte in

Rezyklierungsexperimenten gezeigt werden, dass sowohl der $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ Katalysator als auch die Trägerflüssigkeit Perhydro-Dibenzyltoluol (H18-DBT) unter den verwendeten Reaktionsbedingungen (300°C, 75 bar) stabil sind. Zur beschriebenen Thematik wurde in Kooperation mit der „Universität Duisburg-Essen“ am 7.10.2019 eine wissenschaftliche Publikation eingereicht.

Im Festbettreaktor wurde der $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysator im Jahr 2019 in der kontinuierlichen Betriebsweise untersucht. Dabei lag im Fokus, das Produktivitäts- und Selektivitätsverhalten des Katalysators im industriell relevanten Parameterbereich zu untersuchen und kinetische Daten des Katalysators zu bestimmen. Im Rahmen der Entwicklung eines auf einem Potenzansatz-basierten kinetischen Modells wurden die Reaktionsordnungen der CO_2 -Hydrierung (Reaktion 1) und der RWGS (Reaktion 2) bestimmt. Die ermittelten Reaktionsordnungen der CO_2 Hydrierung lagen mit $n_{\text{CO}_2} = -0,01$ und $n_{\text{H}_2} = 0,64$ im Bereich von Literaturdaten zu einem ähnlichen, aber ungeträgerten Katalysatorsystem (reines In_2O_3) und konnten somit als wissenschaftlich verlässlich bewertet werden. Als weiterer kinetischer Parameter konnte die Aktivierungsenergie zu 66°KJ/mol experimentell bestimmt und als intrinsisch (unabhängig vom Reaktorkonzept) bewertet werden, was eine Abschätzung optimaler Betriebsbedingungen und Reaktordesigns in Zukunft erleichtert. Im Weiteren zeigte ein Vergleich des $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysators mit dem kommerziellen Cu-basierten System die Vor- und Nachteile des Erstgenannten auf. Während die Methanolproduktivitäten pro Katalysatormasse durch den neuen Katalysator bisher nicht gesteigert werden konnten, zeigte dieser allerdings höhere Selektivitäten zu Methanol und damit eine geringere Nebenproduktbildung auf.

Sollen $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysatoren zukünftig kommerziell für die Synthese von Methanol eingesetzt werden, sind geeignete CO_2 -Quellen nötig. Dabei könnte es sich um CO_2 -haltige Abgase industrieller Prozesse (z.B. Stahlproduktion, Ammoniaksynthese) handeln, welche allerdings durch schwefel- (H_2S , SO_2) und stickstoffhaltige (NH_3 , NO_2) Komponenten sowie Kohlenwasserstoffe verunreinigt sind. Der nötige apparative und finanzielle Aufwand einer zwischengeschalteten Gasreinigung hängt dabei von der Resistenz des Katalysators gegenüber den Gasverunreinigungen ab. Deshalb wurde im Jahr 2019 in einer Kooperation mit dem „Department of Chemistry“ der „Technical University of Denmark (DTU)“ untersucht, ob die genannten Gasverunreinigungen zur Vergiftung und somit Deaktivierung des $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysators führen. Neben reaktionstechnischen Untersuchungen lag der Fokus auf der Aufklärung der mechanistischen Hintergründe einer möglichen Katalysatorvergiftung. Dazu kamen in dieser Forschungsk Kooperation die analytischen Techniken CO_2 -TPD, H_2 -TPR, XPS sowie Lichtmikroskopie zum Einsatz. Der Vergleich fotografischer und mikroskopische Aufnahmen von unvergifteten, sowie H_2S -vergifteten $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysatoren vor und nach der Methanolsynthese zeigte eine deutliche morphologische und farbliche Veränderung der Katalysatoren (Abbildung 24).



Abbildung 24: Fotos (oben) und lichtmikroskopische Aufnahmen (unten) eines nicht-vergifteten (links), mit H_2S -vergifteten $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysators vor (mitte) und nach (rechts) der Methanolsynthese aus CO_2 .

Die Untersuchungen des In-basierten Katalysators für die Methanolsynthese aus CO₂ sollen im Jahr 2020 in beiden Reaktorkonzepten fortgeführt werden. Dazu soll in einer weiteren Kooperation mit dem „Lehrstuhl für Technische Chemie I“ der „Universität Duisburg-Essen“ (Prof. Barcikowski) untersucht werden, ob die Katalysatorperformance durch eine neuartige Katalysatorherstellungsmethode (Laserablation) gesteigert werden kann. Da dieses Verfahren die Herstellung von definierten In₂O₃-Nanopartikeln und deren Abscheidung auf ZrO₂ ermöglicht, soll der Einfluss der Nanopartikelgröße mechanistisch aufgeklärt werden.

4.3 Dynamische Simulation und Optimierung des Reaktorkonzepts

Konrad Fischer, Hannsjörg Freund (CRT)

Am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik wird das Verhalten des am EVT entwickelten Reaktorkonzepts mittels stationären und dynamischen Simulationen untersucht. Hierfür ist ein geeignetes mathematisches Modell erforderlich, das in der Lage ist, experimentell bestimmte Daten hinreichend genau zu beschreiben. Ziel ist es, auf Basis des Modells geeignete Prozessbedingungen und Steuergrößen für einen lastflexiblen und dynamischen Reaktorbetrieb zu identifizieren. Des Weiteren wird die Möglichkeit eines *Scale-Up* des Reaktors durch *Numbering-Up* auf Basis einer 3D Simulation diskutiert.

Die Beschreibung des dynamischen Reaktorverhaltens von Festbettreaktoren erfordert geeignete Reaktormodelle. In einer umfangreichen Studie wurden im Rahmen dieses Teilprojekts Reaktormodelle unterschiedlicher Komplexität verglichen³. Dabei unterscheiden sich die Modelle hinsichtlich ihrer Dimensionalität (1D, 2D) und in der Beschreibung der Katalysator- und Gasphase. Die Ergebnisse zeigen, dass für die Beschreibung des stationären Reaktorverhaltens vereinfachte, pseudohomogene Reaktormodelle gut anwendbar sind. Speziell für dynamische Betriebsszenarien sind dagegen heterogene Reaktormodelle notwendig. Im heterogenen Reaktormodell sind separate Bilanzgleichungen für die Gasphase sowie die Feststoffphase (Katalysatorpartikel) enthalten, sodass Temperatur- und Konzentrationsprofile im Partikel dargestellt werden können. Die berücksichtigten Transportwiderstände im Partikel verbessern die Modellgenauigkeit gegenüber pseudohomogenen Reaktormodellen, in denen diese Widerstände vernachlässigt werden. Die Transportwiderstände beeinflussen stark die Trägheit des Systems und sollten daher insbesondere bei der Beschreibung von dynamischen Laständerungen nicht vernachlässigt werden.

Auf Basis der vorausgehenden Erkenntnisse wurde für das am EVT entwickelte Reaktorkonzept ein zweidimensionales, heterogenes Reaktormodell entwickelt. Hierbei wurde ein einzelner Reaktionskanal repräsentativ für den gesamten Reaktor modelliert. Das Reaktormodell beinhaltet gängige Korrelationen für den Wärme- und Stofftransport im Reaktor und zwischen Gas- und Katalysatorphase. Die Reaktionskinetik der Methanisierungsreaktion musste mit einem Modell aus der Literatur beschrieben werden, da keine spezielle Kinetik für den genutzten Katalysator verfügbar war⁴. Die Bilanzgleichungen ergeben ein System aus partiellen Differentialgleichungen, 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 25). 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 zum einen höhere Wirkungsgrade erzielt werden und zum anderen reduzieren sie den Wärmetransportwiderstand zur gekühlten Reaktorwand.

³ Fischer, K.L.; Langer, M.R.; Freund, H.: Dynamic Carbon Dioxide Methanation in a Wall-Cooled Fixed Bed Reactor: Comparative Evaluation of Reactor Models, *Ind. Eng. Chem. Res.* 58(42) (2019) 19406-19420.

⁴ Xu, J.; Froment, G. F.: Methane steam reforming: II. Diffusional limitations and reactor simulation. *AIChE Journal* 35(1) (1989) 97-103.

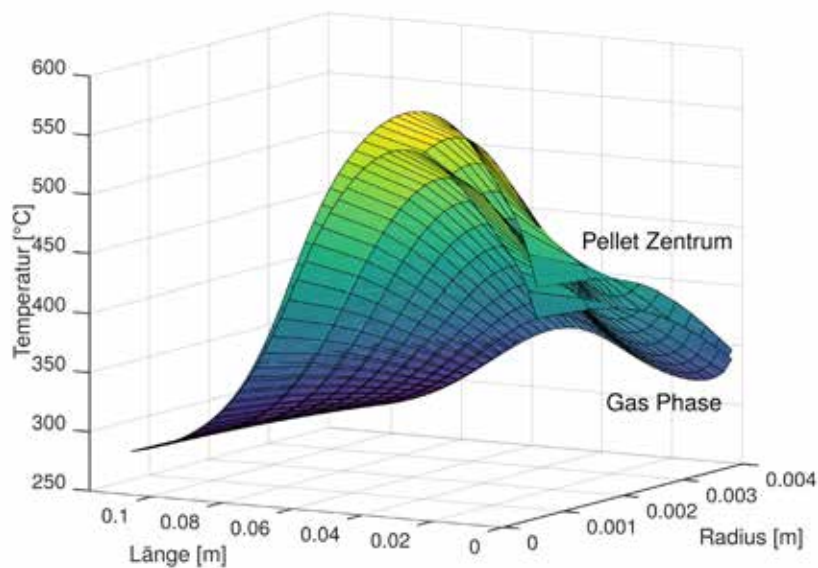


Abbildung 25: Simuliertes, stationäres Temperaturprofil in einem repräsentativen Reaktionskanal. Es liegen ausgeprägte Temperaturunterschiede zwischen Gas- und Katalysatorphase sowie zwischen Reaktorzentrum und –wand vor.

Das dynamische Verhalten des Reaktors wurde auf Basis des oben beschriebenen Modells für verschiedene Betriebsszenarien simuliert. Speziell wurde die Lastflexibilität des Reaktors untersucht. Dazu wird ausgehend von einem stationären Betriebspunkt der Feed-Volumenstrom sprunghaft erhöht bzw. reduziert. Eine Erhöhung des Volumenstroms führt zu einer verringerten Verweilzeit des Gasgemisches sowie zu einem verbesserten Wärmetransport. Dadurch verringert sich der Umsatz und die Temperatur im Reaktor sinkt (siehe Abbildung 26). 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.

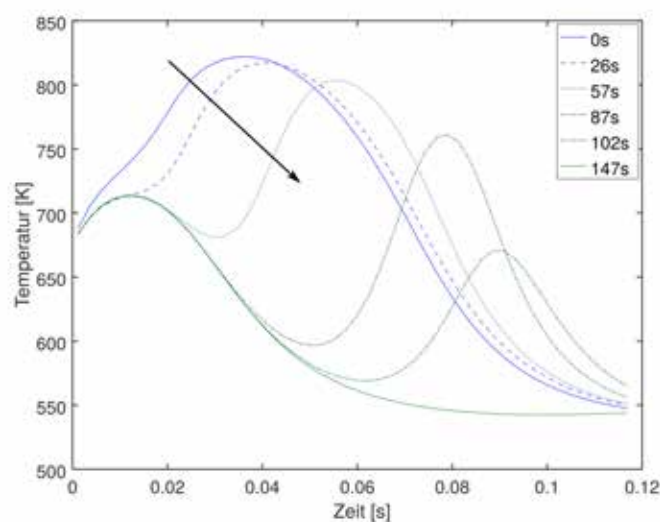


Abbildung 26: Dynamisches Temperaturprofil einer Volumenstromerhöhung im Reaktor. Die Simulation zeigt eine starke Verringerung der Temperatur mit der Zeit.

Ziel des Projekts ist unter anderem auch, ein Reaktorkonzept mit erhöhter Leistung, d.h. ein Scale-Up, zu diskutieren. Ein solcher Scale-Up kann dabei über ein Numbering-Up von Reaktionskanälen erfolgen. Die notwendige Voraussetzung dafür ist, dass das Verhalten der Reaktionskanäle unabhängig von deren geometrischer Positionierung im Reaktorblock ist. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass die Reaktionskanäle nahe der Seitenflächen des Reaktorblocks sehr ähnlichen Bedingungen unterliegen wie Reaktionskanäle im Zentrum des Reaktorblocks. Um diese Annahme zu überprüfen und zu verifizieren wurde ein vereinfachtes 3D Modell des Reaktorblocks mittels COMSOL Multiphysics® erstellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlich positionierten Reaktionskanälen nur gering sind. Ein Scale-Up über Numbering-Up ist also prinzipiell möglich. Allerdings muss bei einem solchem Scale-Up auch eine optimierte Kühlung der heatpipes vorgesehen werden, da hier entsprechend höhere Kühlleistungen erforderlich sind.

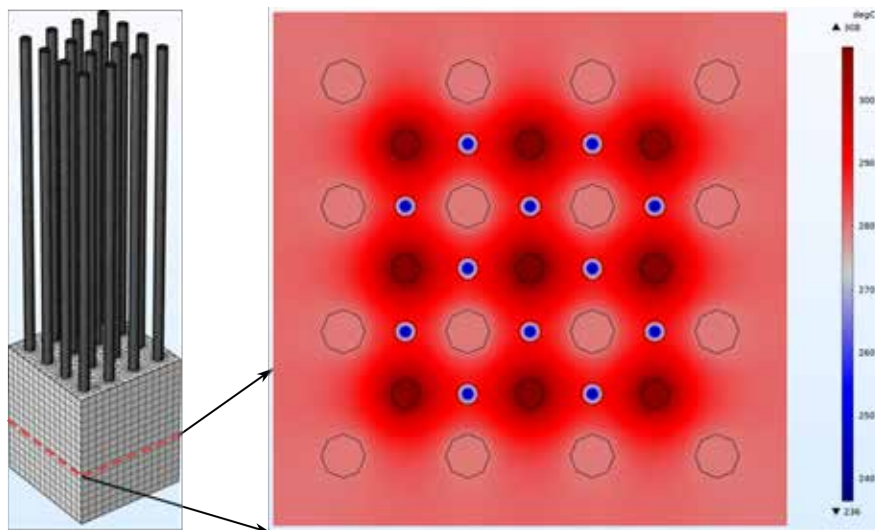


Abbildung 27: Temperaturprofil über den Querschnitt des Reaktorblocks. Die neun Reaktionskanäle (dunkelrot) zeigen untereinander sehr ähnliche Temperaturniveaus.

5 Schlussworte

In den vergangenen Jahren lag der Fokus des Teilprojektsleiters – wie bereits berichtet – auf einer Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen beteiligten Forschungsinstituten und dem Einwerben neuer gemeinsamer Drittmittelprojekte. So konnte mit neuen Projekten im Themenkomplex „Speicher A“ bereits eine beträchtliche Summe an Drittmitteln gewonnen werden, für welche die Förderung des Energiecampus Nürnberg zweifelsohne als Impulsgeber gilt.

Derzeit wird nun auch verstärkt an einer Vernetzung des Energie Campus Nürnberg mit dem ebenfalls vom Freistaat Bayern geförderten Verbundkolleg „Energie“ gearbeitet, um hier vor allem die Kooperationen zwischen Hochschulen und Universitäten im Rahmen gemeinsamer Projekte und Promotionen voranzutreiben. Hier sei vor allem die Anstrengung genannt, mit der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Amberg im Bereich der Turbomaschinen für ORC-Prozesse zu kooperieren.

6 Vorträge & Poster 2019

- [1] Neubert, M.; Hauser, A.; Treiber P.; Karl, J.: 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 - Vortrag
- [2] Fischer, K.L.; Langer, M.R.; Freund, H.: Dynamic Carbon Dioxide Methanation in a Wall-Cooled Fixed Bed Reactor. Comparative Evaluation of Reactor Models. Jahrestreffen Reaktionstechnik, 2019
- [3] P. Schühle; J. Albert, P. Wasserscheid. Application of In₂O₃-catalysts for CO₂-hydrogenation to methanol in slurry and gas phase reactions. Posterbeitrag, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik und des Arbeitsausschusses Thermische Energiespeicherung, 2019
- [4] P. Schühle; S. Reichenberger, G. Marzun, J. Albert. Innovative preparation procedure for In₂O₃-catalysts and their application for CO₂-hydrogenation to methanol. Posterbeitrag, Jahrestreffen Deutscher Katalytiker, 2019
- [5] P. Schühle; S. Reichenberger, G. Marzun, J. Albert. Application of In₂O₃-catalysts for slurry phase hydrogenation of CO₂ to methanol. Posterbeitrag, DGMK Circular Economy – A Fresh View on Petrochemistry, 2019
- [6] D. Steger, C. Regensburger, E. Schlücker: Planung einer regenerativen Wärmepumpen-ORC-Anlage, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt, 6.03.2019 - 7.03.2019
- [7] C. Regensburger, D. Steger, E. Schlücker: Sektorenkopplung - Der Weg zur klimaneutralen Energieversorgung, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt, 6.03.2019 - 7.03.2019
- [8] 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
- [9] 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
- [10] B. Eppinger; D. Scharrer; L. Zigan; P. Bazan; R. German; S. Will: Simulation of Part Load Behaviour of Pumped Thermal Energy Storages with Real Load Profile. IRES 2019 – 13th International Renewable Energy Storage Conference 2019
- [11] D. Scharrer; P. Bazan; R. German: Simulation eines HP-ORC-Wärmespeichersystems: Von der Siedlung bis zum Landkreis. EnCN2 Jahreskonferenz, 2019
- [12] B. Eppinger; L. Zigan; S. Will. Analyse zur Wahl des Arbeitsfluides für ein kombiniertes HP-ORC-System zur Energiespeicherung. Thermodynamik-Kolloquium 2019, Duisburg, 30.9-2.10.2019
- [13] B. Eppinger; L. Zigan; S. Will. Analyse zur Wahl des Arbeitsfluides für ein kombiniertes HP-ORC-System zur Energiespeicherung. EnCN-Jahreskonferenz, Nürnberg, 05.12.2019

7 Veröffentlichungen 2019

- [1] Fischer, K.L.; Langer, M.R.; Freund, H.: Dynamic Carbon Dioxide Methanation in a Wall-Cooled Fixed Bed Reactor: Comparative Evaluation of Reactor Models, Ind. Eng. Chem. Res. 58(42) (2019) 19406-19420.
- [2] P. Schühle; S. Reichenberger, G. Marzun, J. Albert. Application of In₂O₃-catalysts for slurry phase hydrogenation of CO₂ to methanol: Influence of reaction conditions and catalyst support. submitted, 7.10.2019
- [3] 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, 2019, 233, 1078-1093.
- [4] 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
- [5] B. Eppinger; L. Zigan; S. Will. Simulation of a Pumped Thermal Energy Storage based on a reversible HP-ORC-System. Proceedings of the 5th International Seminar on ORC Power Systems, 2019

- [6] 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. Proceedings of the 5th International Seminar on ORC Power Systems, 2019
- [7] E. Hertle, L. Chepyga, A. Osvet, C. J. Brabec, M. Batentschuk, S. Will, L. Zigan. (Gd,Lu)AlO₃:Dy³⁺ and (Gd,Lu)₃Al₅O₁₂:Dy³⁺ as high-temperature thermographic phosphors. Meas. Sci. Technol. 30, 034001, 2019

8 Patente 2019

Im Jahr 2019 wurden keine Patente im Forschungsbereich angemeldet.

9 Literaturverzeichnis

- [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.
- [2] 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*. 229 (2018) 289–298. doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.
- [3] Fischer, K.L.; Langer, M.R.; Freund, H.: Dynamic Carbon Dioxide Methanation in a Wall-Cooled Fixed Bed Reactor: Comparative Evaluation of Reactor Models, *Ind. Eng. Chem. Res.* 58(42) (2019) 19406-19420.
- [4] Xu, J.; Froment, G. F.: Methane steam reforming: II. Diffusional limitations and reactor simulation. *AIChE Journal* 35(1) (1989) 97-103.

SPEICHER B

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU - LS für technische Thermodynamik – Prof. Dr. Michael Wensing; FAU - LS für technische Thermodynamik – Prof. Dr. Stefan Will FAU - LS für chemische Reaktionstechnik – Prof. Dr. Peter Wasserscheid FAU - LS für Prozessmaschinen und Apparatechnik – Prof. Dr. E. Schlücker FAU - LS für Thermische Verfahrenstechnik – Prof. Dr. Wolfgang Arlt FAU - Erlangen Catalysis Resource Center – Prof. Dr. Martin Hartmann FAU - LS für Volkswirtschaftslehre – Prof. Dr. Veronika Grimm FAU - LS für Volkswirtschaftslehre – Prof. Dr. Gregor Zöttl	TPJ1: Effiziente Wasserstoffspeicherung TPJ2: Effiziente Wasserstofflogistik TPJ3: Effiziente Wasserstoffnutzung

Projektbericht 2019

Ziel des Projektes Speicher B ist es, bis 2022 marktreife LOHC-Technologien zu entwickeln. Dabei werden drei wesentliche Bestandteile betrachtet, welche sich auch in den drei Teilprojekten des Speicher B – Projektes wiederfinden. Neben der Weiterentwicklung der Speichertechnologie für stationäre Anwendungen und der Entwicklung und Optimierung wesentlicher Aspekte für die Nutzung der Technologie in der Wasserstofflogistik soll die geschickte Kopplung der LOHC-Technologie mit anderen Technologien die Bandbreite und die generelle Anwendbarkeit von LOHC-Anlagen demonstrieren. Im Rahmen des Projektes Speicher B wird so z.B. die geschickte Verschaltung von BHKWs mit dem LOHC-Prozess untersucht.

Der Energie Campus und der Standort Nürnberg bieten für diese Vorhaben ein optimales Umfeld. Durch die am EnCN beteiligten Lehrstühle für Chemische Reaktionstechnik, Prozessmaschinen und Anlagentechnik und Technische Thermodynamik kann die technische Entwicklung von LOHC-Reaktionssystemen in allen relevanten Aspekten abgebildet werden. Die hohe Expertise des Erlangen Center for Interface Research and Catalysis auf dem Gebiet thermochemischer Energiespeicher erweitert den prozesstechnischen Handlungsraum insbesondere der stationären, LOHC-basierten Wasserstoffspeicherung.

Neben den bereits existierenden Kontakten zum Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (HI-ERN) bestehen seit 2019 über Frau Prof. Dr. Grimm und Herrn Prof. Dr. Wasserscheid ebenfalls direkte Ansprechpartner im neu gegründeten Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). Die dem H2.B zugedachte Rolle als Plattform für Wissenschaft, Industrie und Politik bietet auch dem Projekt Speicher B zukünftig die Möglichkeit, Kontakte zur bayerischen Wasserstoffindustrie zu knüpfen und zu vertiefen.

KONTAKT

Projektkoordinator
Prof. Dr. Peter Wasserscheid

Friedrich-Alexander-Universität
 Erlangen-Nürnberg



E-Mail
 Peter.Wasserscheid@fau.de

Telefon
 +49 9131 85 27420

Web
 www.encn.de

1 Teilprojekt 1: Effiziente Wasserstoffspeicherung

1.1 Optimierung der Reaktionsprozesse

Der zentrale Teil der LOHC- Forschung am Energie Campus ist das sogenannte oneReactor-Konzept. Bei diesem sollen Hydrier- und Dehydrierreaktion abwechselnd im selben Reaktor durchgeführt werden. Das Konzept reduziert die Investitionskosten erheblich und ermöglicht bei geeigneter Prozessführung hochdynamischen Betrieb bei hervorragender Wärmeintegration mit Hilfe von Wärmespeichern, welche ebenfalls im Projekt Speicher B untersucht werden. Die Effizienz der LOHC – basierten Wasserstoffspeicherung hängt im Wesentlichen von der Art und Weise der Bereitstellung der Reaktionsenthalpie der Dehydrierung ab. Muss diese extern oder aus dem erzeugten Wasserstoff zugeführt werden, sinkt der Speicherwirkungsgrad. Könnte die Reaktionswärme aber aus Abwärme anderer Prozesse oder, wie in diesem Fall prozessintern, aus der bei der Hydrierung freigesetzten Energie gespeist werden, sind sehr hohe Wirkungsgrade möglich.

Der Wärmetransport von Hydrierung zu Speicher und schließlich vom Speicher in die Dehydrierung erfordert jedoch, dass die Hydrierung bei höheren Temperaturen abläuft als die Dehydrierung. Klassischerweise erfolgt die Dehydrierung jedoch auf höherem Temperaturniveau als die Hydrierung. Hier setzt nun die Forschung am Energie Campus und am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg an: Während das HI-ERN Strategien und Katalysatoren für die Dehydrierung bei Temperaturen < 250 °C entwickelt, sollen am EnCN Katalysatoren entwickelt, bzw. optimiert werden, die Hydrierungen in Temperaturbereichen > 260 °C ermöglichen.

1.1.1 Selektive Katalysatorsysteme für die Hochtemperaturhydrierung

Aufbauend auf den Versuchen des vorhergehenden Jahres wurde mit der Untersuchung der zyklischen Hochtemperatur-Hydrierung und –Dehydrierung fortgefahren. Unter Nutzung des gemeinsam mit Clariant, ursprünglich nur für die Dehydrierung, entwickelten Pt/AlOx-Katalysators, wurden 250 g unhydriertes Dibenzyltoluol (H0-DBT) über einen Zeitraum von zwei Wochen neunmal hydriert und anschließend unter unterschiedlichen Bedingungen wieder dehydriert. Dabei sollte neben der Hydrierleistung des Katalysators insbesondere das Dehydrierverhalten bei anliegendem Wasserstoffdruck untersucht werden. Die Produktivität der Hydrierung bei 300 °C und 30 bar_a Wasserstoff im betrachteten Hydriergradbereich von 50 % bis 90 % sank in der ersten Betriebswoche um ca. 30 %, blieb anschließend jedoch nahezu konstant. Es zeigte sich, dass der Katalysator nach zwei Wochen Standzeit bei durchgehend hohen Temperaturen noch mehr als die Hälfte der Anfangsaktivität im ersten Versuch aufweist. Man bewegt sich somit nach zwei Wochen auf dem Niveau des langsamsten Versuches der ersten Woche.

Die Dehydrierung folgt einem ähnlichen Verlauf. Auch hier ist die erste Dehydrierung die, die betragsmäßig höchste Produktivität aufweist. Die nachfolgenden Dehydrierungen bewegen sich alle auf einem ähnlichen, um etwa 30 % verringerten Aktivitätsniveau.

Bei Betrachtung der mittels Gaschromatographie bestimmten Anteilen von leicht- (Siedepunkte < Siedepunkt H18-DBT) und schwersiedenden (Siedepunkte > Siedepunkt H0-DBT) Nebenprodukten ist gut zu erkennen, dass die Nebenproduktanteile der Proben nach Dehydrierversuchen im Allgemeinen höher liegen als die der hydrierten Proben. Dies ist einerseits darin zu begründen, dass die Dehydrierung hinsichtlich der Nebenproduktbildung sehr anspruchsvoll ist, da die niedriger hydrierten, aromatischen Spezies stärker an der Katalysatoroberfläche adsorbieren und durch die längere Verweilzeit stärker zur Nebenproduktbildung neigen. Andererseits lassen sich manche der als schwerer siedende Komponenten eingeordneten Substanzen selbst hydrieren und sind dadurch nur sehr schwer von den hydrierten Hx-DBT-Spezies zu unterscheiden.

Werden die Nebenproduktanteile über die einzelnen Zyklen hinweg betrachtet, wird deutlich, dass die Anteile nach Hydrierung wie auch nach Dehydrierung mit zunehmender Zyklenzahl zunehmen. Insgesamt ist zu beachten, dass die in einer Woche in Semi-Batch-Fahrweise realisierten Kontaktzeiten von LOHC und Katalysator ein Vielfaches derer in kontinuierlichen Anlagen darstellen. 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.

1.1.2 Anlage zur automatisierten und standardisierten Katalysatorcharakterisierung

Die unabhängige Bewertung verschiedener Katalysatorsysteme ist ein entscheidender Baustein der Katalysatorentwicklung. Aus diesem Grund wurde eine Laboranlage entwickelt, welche bei höchstmöglichem Automatisierungsgrad standardisierte Dehydrierversuche durchführt, auf Basis derer die Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit eines Katalysators bestimmt werden kann. Da die Kinetik einer Reaktion exponentiell von der Temperatur abhängig ist, liegt ein besonderer Fokus auf der Temperierung des Reaktionssystems. Der eigentliche Rohrreaktor wurde mitsamt eines Teils der Zu- und Ableitungen in den Ofen eines Gaschromatograph eingebracht. Dieser ist wie die Zufuhrpumpe und die Messtechnik mit der Anlagensteuerung verbunden, so dass ein vollautomatischer Versuchsbetrieb möglich ist.

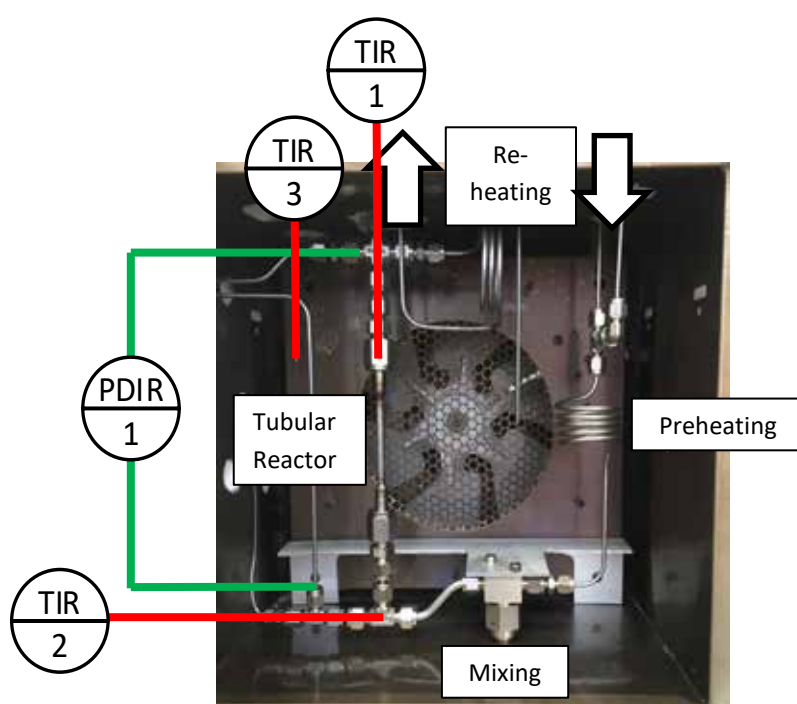


Abbildung 1: Blick in den Ofenraum der Charakterisierungsanlage.

Als Reaktor wird ein Rohrreaktor verwendet, der nach dem single bead string – Prinzip betrieben wird.¹ Das bedeutet, der Katalysator wird nicht als Festbett, sondern als Reihe von einzelnen Pellets genutzt. Die Pellets sind demnach in etwa in der gleichen Größenordnung wie der Rohrrinnendurchmesser und können so im Rohr aufeinander gestapelt werden. Diese Geometrie zeichnet sich durch niedrigen Druckverlust und niedrige axiale Rückvermischung bei gleichzeitig kleinen einzusetzenden Katalysatormengen aus.

¹ J. Reijn, W. Van der Linden, H. Poppe. Dispersion in Open Tubes Packed with Glass Beads – The Single String Bead Reactor. *Analytica Chimica Acta* 229-237, 123, 1981



Abbildung 2: Gesamtaufbau Charakterisierungsanlage im Wasserstofftechnikum.

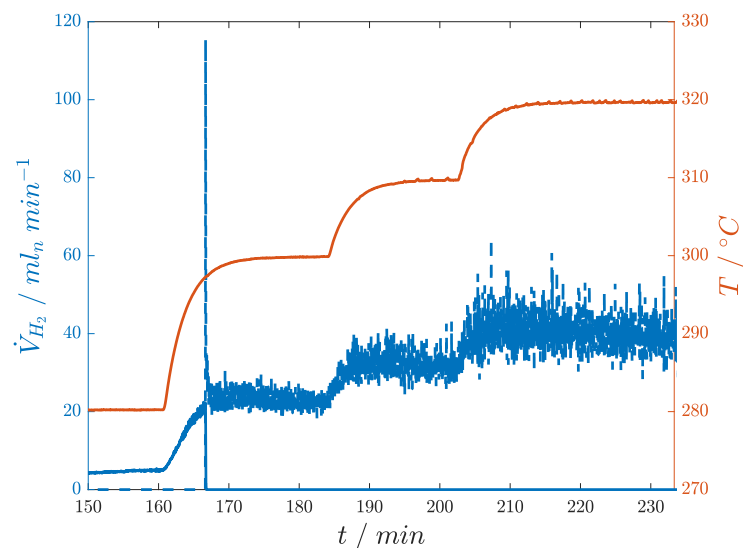


Abbildung 3: Versuchsaufzeichnung automatisierte Katalysatorcharakterisierung. Versuchsbedingungen: Einwaage $m_{\text{Pt}/\text{AlO}_x}=0,47 \text{ g}$ ($2,3 \text{ mm} < d_p < 3,15 \text{ mm}$); $V_{\text{H}_2\text{-DBT}} = 1 \text{ g/min}$; $p_R = \text{atm}$;

Nach Aufbau und Einbringung der Anlage in das Wasserstofftechnikum wurde mit der Charakterisierung der Anlage in ersten Experimenten begonnen. Zum einen wurden die Strömungsverhältnisse im Innern durch Cold-Flow-Versuche untersucht, zum anderen wurden gegen Ende des Jahres erste Versuche mit aktivem Katalysator unternommen. Beispielhaft ist in Abbildung 3 die Aufzeichnung eines Dehydrierexperiments gezeigt. Deutlich zu erkennen ist das Ansteigen der freigesetzten Wasserstoffmenge mit jeder Erhöhung der Reaktionstemperatur. Gleichzeitig ist für die einzelnen Temperaturstufen ein leichter Aktivitätsabfall mit zunehmender Reaktionszeit zu erkennen. Beide Effekte sollen in Langzeitversuchen für verschiedene Katalysatoren untersucht werden.

1.2 Thermochemische Energiespeicherung im LOHC-Prozess

1.2.1 Einführung

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 zu vermeiden, bzw. auszugleichen. Vor allem ermöglicht sie jedoch, die Abwärme industrieller Prozesse oder allgemein exothermer Reaktionen wie die LOHC-Hydrierung sinnvoll wiederverwenden zu können. Dabei sollen die eingesetzten Reaktanten möglichst ungiftig sein und eine gute Wärmeübertragung ermöglichen.

Die beim LOHC-Hydrierungsprozess zur Verfügung stehende Wärme liegt auf einem Temperaturniveau von ca. 200 bis 300 °C. Somit ergibt sich ein Bedarf an Speichersystemen in diesem hohen Temperaturbereich. Im Allgemeinen weisen thermochemische Energiespeicher die theoretisch höchsten Wärmespeicherdichten auf und sind deshalb von großem Interesse. Der Fokus dieses Projektes liegt auf Feststoff-Reaktionssystemen. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Systeme dargestellt, die auf Grund ihres Temperaturbereichs für dieses Teilprojekt besonders relevant sind.

Tabelle 1: Übersicht thermochemischer Energiespeicher

Reaktionssystem	Reaktionsgleichung	Anwendungsbereich
Calciumchlorid - Wasser	$\text{CaCl}_2 + n \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \Delta H_R$	< 200 °C
Magnesiumoxid - Wasser	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{OH})_2 + \Delta H_R$	250 - 350 °C
Zeolith Y (NaY)	$\text{NaY} + n \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NaY} \cdot n\text{H}_2\text{O} + \Delta H_R$	150 - 300 °C

Das Ziel ist die Entwicklung eines effizienten, langzeitstabilen Speichers mit einer möglichst hohen Speicherkapazität. Hierzu werden die genannten Verbindungen (Tabelle 1) auf poröse Trägermaterialien aufgebracht bzw. eingebracht, um eine Verbesserung des Wärme- und Stofftransports, sowie der Zyklenstabilität zu erreichen. Aktuell liegt der Schwerpunkt auf Wasser als Wärmeüberträger und Reaktant. Zusätzlich sollen reine Wasseradsorptionsprozesse an porösen Materialien wie Zeolithen (Tabelle 1) untersucht werden.

1.2.2 Ergebnisse aus dem Jahr 2019

Die bisher besten Ergebnisse stellen die bereits im letzten Bericht erwähnten zeolithischen Materialien dar. Hierbei wird der bereits im großen Maßstab industriell hergestellte Zeolith Y verwendet. Bei einer konstanten Reaktortemperatur größer als 150 °C ist ein Temperaturhub (ΔT) von bis zu 120 °C. möglich, welcher über die getesteten 20 Zyklen stabil ist. Weitere erste Optimierungen dieses Wärmespeichermaterials wurden durch einen Kationenaustausch erzielt. Der Zeolith Y wird standardmäßig in seiner Natriumform (NaY) verkauft. Durch einen in unserem Labor optimierten Ionenaustauschmethode konnte dieser erfolgreich in andere Kationenformen überführt werden. Die mit Hilfe eines DVS-Analysegeräts (Dynamische Dampfsorption, engl. *dynamic vapor sorption*) aufgenommenen Wasserdampfisothermen zeigen deutlich, dass die Wassersorptionskapazität verbessert werden konnte (Abbildung 4a). Dabei wurde weiterhin ein Temperaturhub von 100 °C bis 120 °C über 20 Zyklen mit einer konstanten Wasserkapazität bei einer Reaktortemperatur von 180 °C realisiert (Abbildung 4b).

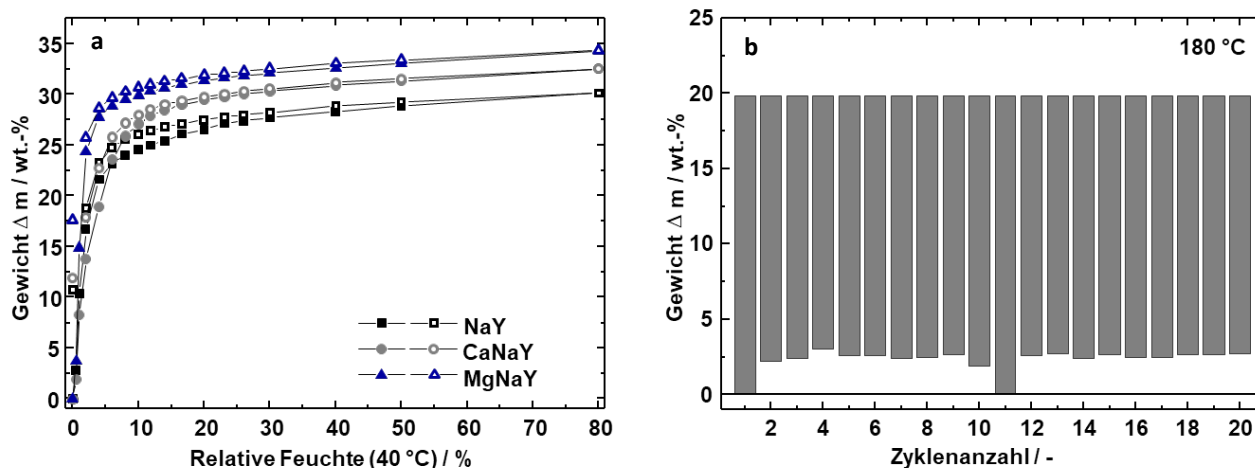


Abbildung 4: a) DVS: Wasserdampfisothermen bei 40 °C der kationenausgetauschten Zeolithen; Austauschgrad Ca 88 % und Mg 67 %
b) STA: Gewichtsänderung von Zeolith-Y-Pellets während der Hydratisierung bei 180 °C

Die ersten Meilensteine sind damit erreicht: Der ionengetauschte Zeolith Y konnte als geeignetes Speichermaterial identifiziert und hinsichtlich seiner Zyklenstabilität getestet werden. Weitere Optimierungsansätze sind bereits definiert und neue Synthesestrategien für Materialien mit höherer Speicherkapazität in Bearbeitung.

Des Weiteren wurde der neue TG-DSC-Sensor (Thermogravimetrie, Dynamische Differenzkalorimetrie, engl. *differential scanning calorimetry*) für die STA-Anlage (Simultane Thermische Analyse) installiert. Dieser erlaubt es, neben dem Probengewicht, kalorimetrische Daten während des Energiespeicherungs- (Dehydratisierung) und Entladungsprozesses (Hydratisierung) aufzunehmen. Erste Tests mit dem Sensor ergaben vielversprechende Ergebnisse für ein besseres Verständnis des Speichersystems.

1.2.3 Derzeitige Forschung und Ausblick

Die beschriebenen Zeolithsysteme basieren auf rein sorptiven Prozessen. Hierbei kann also nur die Sorptionsenthalpie genutzt werden. Um die Kapazität bzw. die Energiedichte von Wärmespeichermaterialien weiter zu erhöhen, muss die Reaktionsenthalpie einer geeigneten reversiblen chemischen Reaktion verwendet werden. Die bisher synthetisierten Materialien, die eine chemische Reaktion nutzen sollten, wiesen jedoch deutlich schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu reinen Zeolithen auf. Bei diesen Synthesen wurde immer ein bekannter poröser Träger verwendet, welcher nachträglich imprägniert wurde. Dabei ergaben sich einige Probleme wie z.B. das Auskristallisieren der Reaktanten auf der Oberfläche der Träger oder eine starke Beladungslimitierung. Deshalb wurden neue Synthesestrategien entwickelt, bei denen die Reaktanten wie bspw. Magnesiumoxid zunächst in Form von Nanopartikel synthetisiert werden. Anschließend sollen mit Hilfe einer organischen Vorläuferverbindung die Partikel in eine poröse Matrix (Träger) eingebaut werden, indem dieses um und zwischen den einzelnen Partikeln wächst. Hierbei bieten sich vor allem Carbonisierungen von Kohlenstoffmaterialien oder angepasste Zeolithsynthesen an. Dazu wird aktuell eine Masterarbeit angefertigt und weitere sind in Planung.

Außerdem müssen die bisherigen Ergebnisse der kationenausgetauschten Zeolithe mit dem neuen DSC-Sensor untersucht werden um die tatsächlich freiwerdende und somit nutzbare Wärme zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Daten könnte ein Reaktorkonzept entwickelt werden, welches es ermöglicht, Wärmespeicher mit einer LOHC-Anlage zu verbinden um die Gesamteffizienz zu erhöhen.

2 Teilprojekt 2: Effiziente Wasserstofflogistik

2.1 Konzept zur direkten Beheizung eines LOHC-Freisetzers mit einem Brenner

Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Entwicklung eines neuartigen Heizkonzepts für die LOHC-Dehydrierung in LOHC-Speichersystemen. Die im Freisetzer benötigte Energie wird dabei über eine direkte Beheizung mit einem Brenner eingebracht.

In enger Abstimmung zwischen dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und dem Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik wird ein kombiniertes System aus Wärmeübertrager und Brenner für die Beheizung des Freisetzers entwickelt, dimensioniert, konstruiert und umgesetzt. Der Inhalt des ersten Projektabschnitts war die Entwicklung und Inbetriebnahme eines skalierbaren, kostengünstigen und voll funktionsfähigen Laboraufbaus. Dabei wurden erste Messwerte aufgenommen und das System über eine simulative Abbildung charakterisiert. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurde der Prüfstand umgebaut und die Dehydriereinheit optimiert.

Im Berichtszeitraum wurden sowohl Umbauten an der Brenner-Dehydriereinheit als auch ein kompletter Neuaufbau der Laboranlage durchgeführt (siehe Abbildung 5). Anschließend erfolgte die erneute Aufnahme von Messdaten zum Aufheizverhalten der Dehydriereinheit an der Laboranlage.



Abbildung 5: System mit einem Porenbrenner als Wärmequelle und der nachgeschalteten Dehydriereinheit (links) sowie neu aufgebaute Laboranlage mit den wichtigsten Komponenten (rechts).

Die durchgeführten Umbauarbeiten am Brenner umfassen den Einsatz eines Glühzünders für den Startvorgang und die Anbringung einer automatisierten Flammenüberwachung. An der Dehydriereinheit wurde das Dichtungssystem überarbeitet. Die neue Laboranlage ist modular aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus drei Hauptbestandteilen. Diese sind das Pumpenmodul für die Zuführung des beladenen LOHCs, der Brenner-Dehydriereinheit und dem Gestell inklusive der erforderlichen Sicherheits- und Messtechnik zur Durchführung des Dehydrierprozesses und zur Aufnahme der gewünschten Messdaten. Die neue Laboranlage wird über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) gesteuert und ist in großen Teilen automatisiert. Somit ist es möglich, Messreihen unter konstanten, gut vergleichbaren Randbedingungen durchzuführen. Sämtliche Module sind so ausgeführt, dass sie nach der Hochskalierung des Brenners und der Dehydriereinheit weiter genutzt werden können.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Laboranlage wurden Messreihen, unter anderem zur Dynamik des Systems und zu den Schadstoffkonzentrationen des Porenbrenners durchgeführt. In früheren Untersuchungen lag der Fokus auf dem Aufheizverhalten des LOHCs ohne die Anwesenheit eines Katalysators oder einer gasförmigen Phase im Dehydrierer. Besonderes Augenmerk der jetzigen Messungen waren Temperaturänderungen und somit Variationen der Aufheizzeiten für den Fall eines Systems aus LOHC und einer gasförmigen Phase im Dehydrierer. Als Ersatzgas für Wasserstoff wurde aus sicherheitstechnischen Überlegungen zunächst Stickstoff gewählt. Dabei entsprach der Stickstoffvolumenstrom ungefähr dem erwarteten Wasserstoffvolumenstrom von 1 l/min. Die Schadstoffkonzentrationen des Porenbrenners wurden im Abgasstrang nach dem Dehydrierer mit einem Abgasmessgerät vom Typ Testo 350 über eine Sonde gemessen. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind in Abbildung 6 zu sehen.

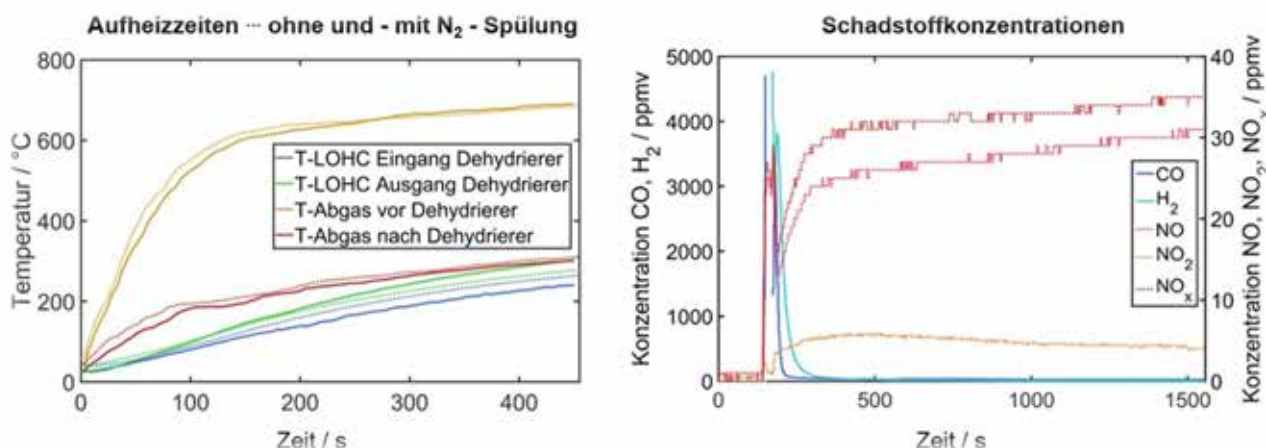


Abbildung 6: Aufheizzeiten mit und ohne Stickstoffspülung im System (links) sowie zugehörige Schadstoffkonzentrationen des Porenbrenners (rechts) für eine Brennerleistung von 1 kW und einen LOHC-Massenstrom von 0,5 kg/h

Diese Messungen zeigen, dass der gewünschte Temperaturbereich für die Dehydrierung des im LOHC gebundenen Wasserstoffs von 280°C - 320°C für einen LOHC-Massenstrom von 0,5 kg/h, einen Druck im Dehydrierer von 1 bar, eine Brennerleistung von 1,0 kW bei einem Luft-Brennstoffverhältnis von 1,2 nach ca. 7 Minuten erreicht wird. Somit kann durch die direkte Beheizung des Dehydrierers mit einem Brenner eine hohe Systemdynamik realisiert werden. Die Abgastemperatur des methanbetriebenen Porenbrenners beträgt ca. 680°C vor der Dehydriereinheit und ca. 320°C nach der Dehydriereinheit. Diese Werte untermauern die hervorragende Übertragung der Abgaswärme in den Freisetzer. Im Freisetzer ergibt sich ohne Stickstoffzugabe ein Temperaturgefälle zwischen Einlass und Auslass von ca. 20 K. Mit Stickstoffzugabe steigt dieses durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit und den veränderten Wärmeübergang auf ca. 50 K an. Generell werden die Solltemperaturen mit Stickstoffspülung schneller erreicht (Abbildung 6, linkes Bild). In Abbildung 6 (rechts) sind die Schadstoffkonzentrationen beim Start des Porenbrenners mit anschließendem Aufheizvorgang des LOHCs zu sehen. Die NO_x-Konzentration beim methanbetriebenen 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 ≤ 120 kW) liegt. Nach der Brennerzündung findet kaum noch CO-Bildung statt. Dies deutet auf eine vollständige Verbrennung des CH₄ hin, was auch durch den H₂-Anteil im Abgas bestätigt wird, welcher den gleichen Verlauf zeigt.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen sollen die weiteren Messreihen geplant werden. Die Ergebnisse fließen außerdem in die Optimierung der bestehenden Simulationen ein und dienen als Grundlage für die Auslegung und Konstruktion eines leistungstärkeren Dehydrierers im kommenden Jahr. Im letzten Projektjahr wird ein größerer und optimierter Dehydrierer konzipiert, konstruiert und in Betrieb genommen. Außerdem werden weitere Messdaten zum Aufheizvorgang und zur Wasserstofffreisetzung erzeugt. Die Variation von verschiedenen Einflussparametern wird durchgeführt. Abschließend erfolgt über eine Wirtschaftlichkeitsanalyse ein Vergleich mit alternativen Dehydriererkonzepten, die gewonnenen Ergebnisse werden zusammengefasst und Konzepte zum Scale-Up erstellt.

2.2 Direkt elektrisch beheizte Dehydrierung

Dieser Projektteil wurde am Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik von Prof. Dr. Peter Wasserscheid durchgeführt. Die Bereitstellung von Wasserstoff an einer LOHC-Tankstelle benötigt Wärme auf einem erhöhten Temperaturniveau von 240-320°C. Diese Wärmeenergie kann auf unterschiedliche Weisen bereitgestellt werden. Eine aufgrund ihrer Robustheit und Kompaktheit auch in Hinblick auf mobile Anwendungen interessante Möglichkeit der Wärmezufuhr ist die direkte elektrische Beheizung des Reaktionsapparates. Im vorangegangenen Jahr konnte gezeigt werden, dass die Reaktionsmischung durch additiv gefertigte Widerstandsheizelemente sehr gleichmäßig aufgeheizt werden kann.

Zielsetzung in TP2 sind direkt beheizte, katalytisch aktive Strukturen. Weiterführende Untersuchungen beschäftigten sich daher mit der Beschichtung der additiv gefertigten Gitterstrukturen. Die Strukturen wurden dabei zunächst mit einer porösen Trägerschicht aus Aluminiumoxid versehen. Diese sorgt für eine höhere spezifische Oberfläche, sowie verbesserte Haftung und eine feine Dispersion der aktiven Komponente Platin. Bei der Aufbringung muss darauf geachtet

werden, dass die Schicht gleichmäßig ist und im späteren Einsatz trotz unterschiedlicher thermischen Ausdehnungskoeffizienten von beheizter Metallstruktur und anorganischer Trägerschicht auch im zyklischen Betrieb stabil bleibt.



Abbildung 7: Mikroskopaufnahme (zehnfach vergrößert) einer Sprühbeschichteten Struktur.

Nach Imprägnierung der Trägerschicht mit Platin wurden die Strukturen in der kontinuierlichen Dehydrierung von H18-Dibenzyltoluol (H18-DBT) getestet. Dabei wurden unterschiedliche Aspekte untersucht. Neben der Variation einzelner Parameter wie der Heizleistung oder des Feedstroms wurden auch Anfahrstrategien und die dynamische Betriebsweise des direkt beheizten Dehydrierers getestet. Im Folgenden soll der dynamische Betrieb näher betrachtet werden.

Die Untersuchungen der dynamischen Betriebsweise wurden bei konstantem H18-DBT-Eingangsstrom von 4 ml/min durchgeführt. Die Anschlussleistung der beheizten Struktur wurde dagegen im Verlauf des Experiments (Abbildung 8) schrittweise von 160 W auf 200 W erhöht. Es ist deutlich zu erkennen, dass unmittelbar nach Erhöhung der Leistung auch die Temperaturen in den einzelnen Reaktorabschnitten ansteigen. Gleichzeitig nimmt die Wasserstoffproduktion rasch zu.

Die schnelle Ansprechzeit des Systems durch die direkte Beheizung im Reaktor zeigt, dass mit einem solchen System eine hoch dynamische Fahrweise der Dehydrierung, wie sie für die bedarfsgerechte Wasserstofffreisetzung in mobilen Anwendungen oder aber auch an Wasserstofftankstellen notwendig ist, umsetzbar ist.

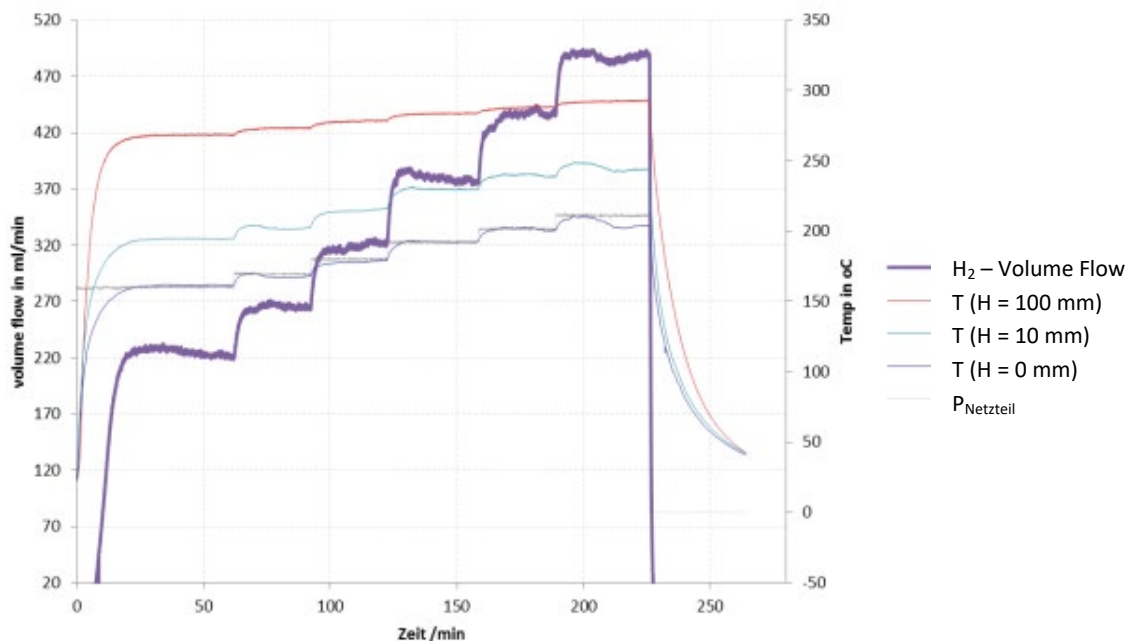


Abbildung 8: Versuch zur Leistungsvervariation (160 W - 200 W) im direkt elektrisch beheizten Dehydrierer. Pt/AlOx-beschichtete Ti6Al4V Struktur. H18-DBT Eingangsstrom 4 ml/min.

In Abbildung 8 wird ebenso ersichtlich, dass im Betrieb eine signifikante Temperaturspreizung zwischen Einlass- und Auslassbereich der Struktur besteht. Da die Reaktionsrate der Dehydrierung stark temperaturabhängig ist, bedeutet das, dass die eingebrachte Menge Platin nur unvollständig zur Katalyse der Reaktion beitragen kann. Dies zeigen auch die niedrigen Produktivitäten $< 1 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{g}_{\text{Pt}}$, die in den Versuchsreihen erzielt wurden.

Ein Ansatzpunkt zur Optimierung des Platineinsatzes ist daher, die Vorwärmung zu verbessern. Neben intensiverer Vorheizung im Zulauf soll eine unbeschichtete Struktur zum definierten Vorheizen im Reaktor zum Einsatz kommen. Auf diese Weise wird Platin nur dort eingebracht, wo es auch katalytisch aktiv sein kann. Zudem kann die rein metallische Struktur noch dynamischer betrieben werden, da keine Rücksicht auf die Beschichtung genommen werden muss.

Im kommenden Jahr sollen Möglichkeiten erörtert werden, wie die Beheizung effizienter gestaltet werden kann. Zeitgleich soll das Prinzip der direkt beheizten katalytischen Schichten auch auf andere Geometrien übertragen, so dass neben Rohrreaktoren zum Beispiel auch flache Platten katalytisch beschichtet werden können.

2.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Im Rahmen eines interdisziplinären Projektvorhabens zwischen Forschenden der Ingenieurwissenschaften und Wirtschaftswissenschaften werden synthetische Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als nachhaltige Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft untersucht. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Auswirkungen verschiedener Strommarktdesigns auf die Produktionskosten der Kraftstoffe. Runge et al.² zeigen, dass die Ausgestaltung der Marktregeln sowohl einen erheblichen Einfluss auf die Produktionskosten als auch auf die optimale Ausgestaltung des Produktionsprozesses haben kann. Aktuell wird im Rahmen der Kooperation das globale Potential nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe untersucht, da diese Kraftstoffe CO₂-neutrale Alternativen zu konventionellen Erdölprodukten darstellen. Bei der Produktion von synthetischen Kraftstoffen machen Stromkosten einen wesentlichen Teil der Herstellungskosten aus. Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien sind in den letzten Jahren stark gesunken, variieren global aber sehr stark. Es werden mögliche Produktionsstandorte weltweit evaluiert, die sich durch die gute

² 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

Verfügbarkeit und ihr großes Potential erneuerbarer Stromerzeugung auszeichnen und aus denen in Zukunft Wasserstoff nach Deutschland und Europa importiert werden könnte.

2.4 Wärmeübertragungskompressor für die LOHC-Vorwärmung

Im Projektverlauf werden zwei Testanlagen aufgebaut: ein Kolbenkompressor und ein Schraubenkompressor. Der Kolbenkompressor wird für den hohen Druckbereich über 700 bar designt, der Schraubenkompressor für niedrigere Drücke. Die Idee zum Aufbau der Testanlagen wurde bereits in früheren Berichten formuliert. Deswegen werden nun hauptsächlich die bisher entstandenen Ergebnisse präsentiert und zukünftige Vorhaben beschrieben.

Bislang sind einige Versuche am Kompressor mit einem nicht-brennbaren Gas (Stickstoff) durchgeführt worden. Abbildung 9 zeigt den Temperaturanstieg in der Kompressionskammer während der Kompression und den entsprechenden Druckanstieg in der Druckleitung. Diese hohen Drücke werden in nur einer Stufe mit Hilfe eines LOHC+ Fallfilms erreicht.

Die Anlage steht nun für erste Versuche mit Wasserstoff bereit. Nichtsdestotrotz wird weiterhin daran gearbeitet, die Effizienz der Anlage zu verbessern, um noch höhere Drücke zu erreichen und noch mehr Wärme aus dem komprimierten Gas absorbieren zu können.

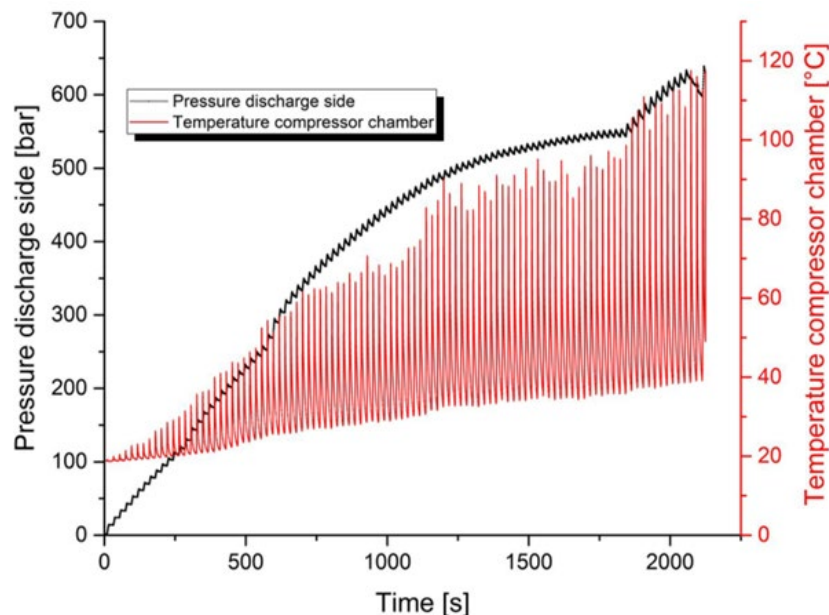


Abbildung 9: Druck- und Temperaturanstieg während der Kompression von Stickstoff

Der ausgelegte Prototyp ermöglicht keine hohen Kolbengeschwindigkeiten. Deshalb wird 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. Verschiedene, für diesen Kolbenkompressor typische Betriebsgeschwindigkeiten werden verglichen und es wird die maximale Kolbengeschwindigkeit ermittelt, bis zu welcher die Flüssigkeitsschicht stabil ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flüssigkeitsschicht bis zu einer maximalen Kolbengeschwindigkeit von 0,14 m/s stabil ist und laminar bzw. transient fließt. In Abbildung 10 ist der Kolben mit der mit der LOHC-Schicht zu sehen. Der nächste Schritt ist nun die Optimierung der Dicke der Flüssigkeitsschicht.

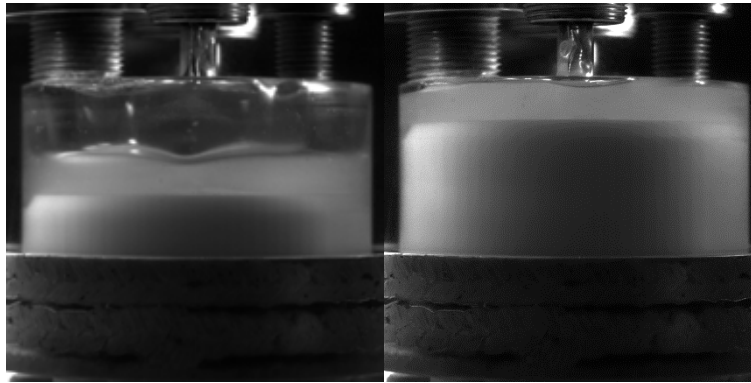


Abbildung 10: Kolben mit der LOHC+ Schicht am unteren (links) und oberen (rechts) Totpunkt

Wegen der speziellen Anforderungen von Wasserstoff-Anwendungen wird eine Schraubenverdichter-Anlage aufgebaut. Die Forschungsanlage befindet sich aktuell im Aufbau, weitere Voruntersuchungen werden an einem ähnlichen Schraubenverdichter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik durchgeführt. Die aus diesen Experimenten gewonnenen Erfahrungen werden entscheidenden Einfluss auf die Planung und den Betrieb der neuen Schraubenverdichter-Anlage haben.

3 Teilprojekt 3: Effiziente Wasserstoffnutzung

3.1 BHKW im Wasserstoff-Erdgas-Mischbetrieb

Die bedarfsgerechte Wasserstofffreisetzung aus LOHC-Materialien erfolgt anhand der 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 alle auf Dibenzyltoluol (H0-DBT) bzw. Perhydrodibenzyltoluol (H18-DBT). Zur Dehydrierung wird temperaturabhängig eine Wärme von 65 bis 70 kJ je Mol Wasserstoff ($\approx 27\%$ 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 Abgasenergien 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, CO₂-Emission und Schadstoffemissionen, wobei die notwendige Energie für die Dehydrierung vollständig aus der Abgasenthalpie gedeckt wird. Für alle nachfolgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass regenerativ erzeugter Wasserstoff verfeuert wird, die CO₂-Emissionen also ausschließlich aus dem verfeuerten Methananteil herrühren.

Im Kalenderjahr 2019 liegen die endgültigen Ergebnisse aus den Messungen an einem Versuchsmotor im Wasserstoff-Methan-Mischbetrieb vor und das im Programm *GT Power* von *Gamma Technologies* erstellte Simulationsmodell ist fertiggestellt und kalibriert. Es ist mit allen aus den Motormessungen erzeugten Daten abgeglichen und kann herangezogen werden, um Ergebnisse in feiner Auflösung zu generieren.

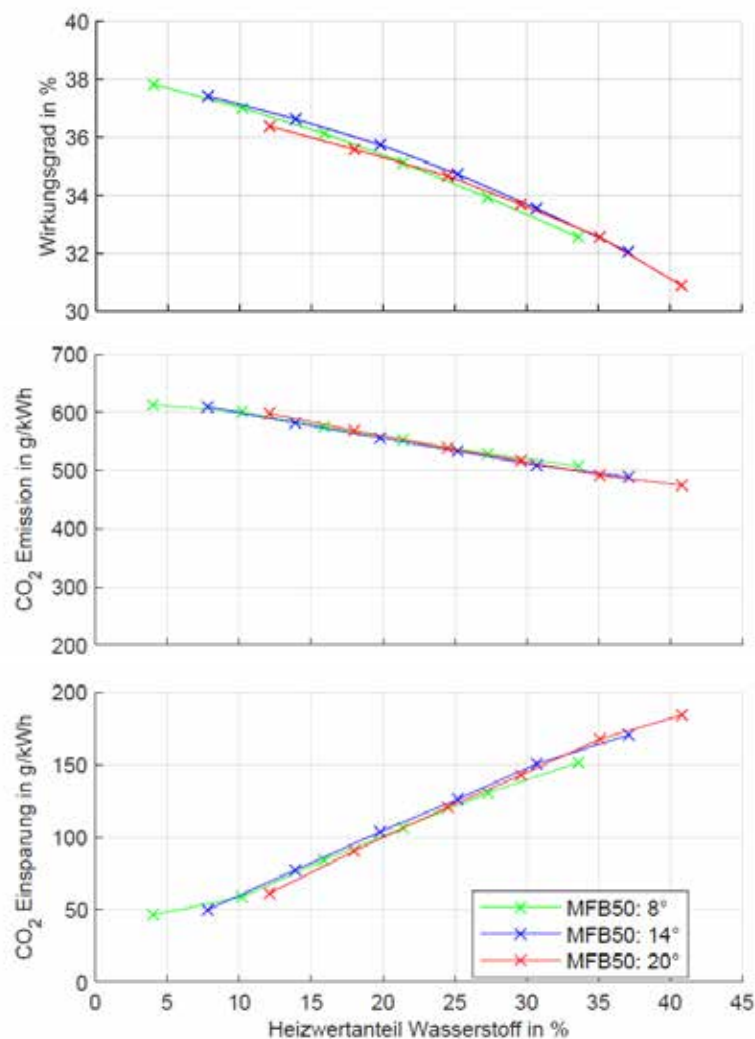


Abbildung 11: Verlauf des Wirkungsgrades, der CO₂-Emissionen sowie des CO₂-Einsparpotentials über dem Heizwertanteil des Wasserstoffs im Brenngas

In Abbildung 11 sind als Endergebnis der Kombination aus Simulation und Motormessungen der Wirkungsgrad, die CO₂-Emissionen und das CO₂-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 werden kann. Dieser, nicht mehr als mechanische Leistung zur Verfügung stehende, Anteil führt dann naturgemäß zu einem geringeren Wirkungsgrad. Bemerkenswert ist jedoch der Verlauf des CO₂-Einsparpotentials, beziehungsweise der CO₂-Emissionen. Es wurde erwartet, dass bei sehr hohen Anteilen an Wasserstoff der Wirkungsgrad sehr stark sinkt und dadurch der Gesamtbrennstoffmassenstrom so sehr steigt, dass der höhere Wasserstoffanteil überkompensiert wird. Dies konnte nicht beobachtet werden. Dieser Effekt wäre an einem Wiederansteigen der CO₂-Emissionen zu erkennen. Im untersuchten Bereich ist jedoch eine stete, wenn auch degressive Einsparung an CO₂ mit steigendem Wasserstoffgehalt zu beobachten. Noch höhere Wasserstoffanteile waren innerhalb der Grenzen der vom Motor tolerierten Randbedingungen nicht realisierbar.

Eine andere Möglichkeit den Wasserstoffanteil weiter zu steigern und respektive die CO₂-Emissionen zu senken bietet sich bei Absenken der Wasserstofffreisetzungstemperatur. So kann die Freisetzungstemperatur beispielsweise gesenkt werden, indem vor der endgültigen H₂-Freisetzung transferhydriert wird. Das bedeutet, dass Wasserstoff von H18-DBT auf einen weiteren Wasserstoffträger übertragen wird, welcher bei niedrigeren Temperaturen im selben oder in einem unmittelbar nachfolgenden Reaktor elementaren Wasserstoff freisetzen kann. Eine Stoffpaarung, die im LOHC-Umfeld bisher vor allem im Zusammenhang mit der Nutzung in Direktbrennstoffzellen betrachtet wurde, ist das System Isopropanol – Aceton. Aceton kann bei Temperaturen um 180 bis 200 °C in nahezu thermoneutraler, katalytischer

Reaktion Wasserstoff von H18-DBT aufnehmen und das so gebildete Isopropanol kann im selben Temperaturbereich an einem anderen geeigneten Katalysator zu Aceton und elementarem Wasserstoff umgesetzt werden. Durch die nun größere Temperaturdifferenz zwischen Motor-Abgastemperatur und den Reaktionstemperaturen dieser beiden Schritte steigt der Anteil der zur Dehydrierung nutzbaren Abgasenthalpie. Auf diese Weise könnten die CO₂-Emissionen weiter gesenkt werden.

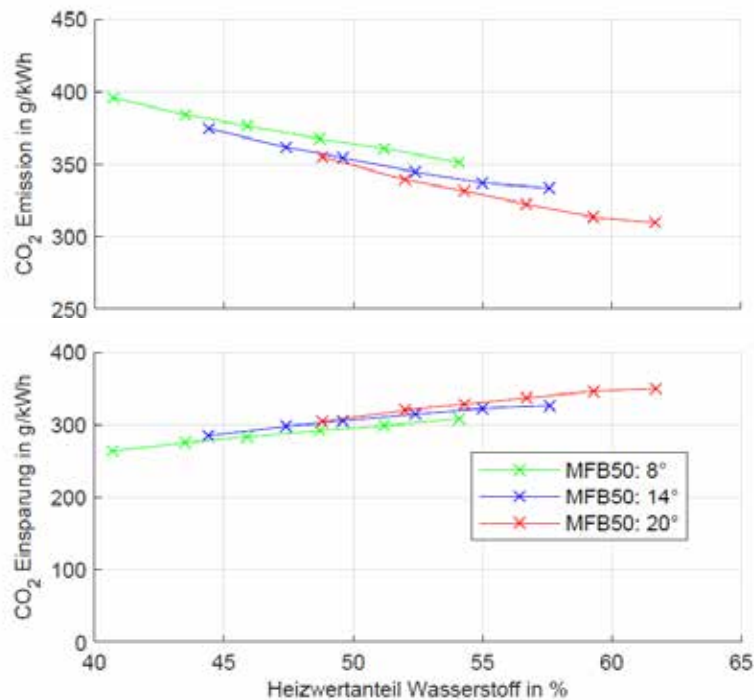


Abbildung 12: Verlauf des Wirkungsgrades, der CO₂-Emissionen sowie des CO₂-Einsparpotentials über dem Heizwertanteil des Wasserstoffs im Brenngas für eine Wasserstoff-Freisetzungstemperatur von 190 °C.

Abbildung 12 zeigt deutlich, dass bei Betrachtung der abgesenkten Reaktionstemperaturen ein weiteres CO₂-Einsparpotential gehoben werden kann. Im Punkt geringster Emissionen lassen sich bis zu 350 g/kWh CO₂ einsparen. Abbildung 13 zeigt schließlich das Potential, wenn es gelingen sollte, die Dehydriertemperatur noch weiter zu senken.

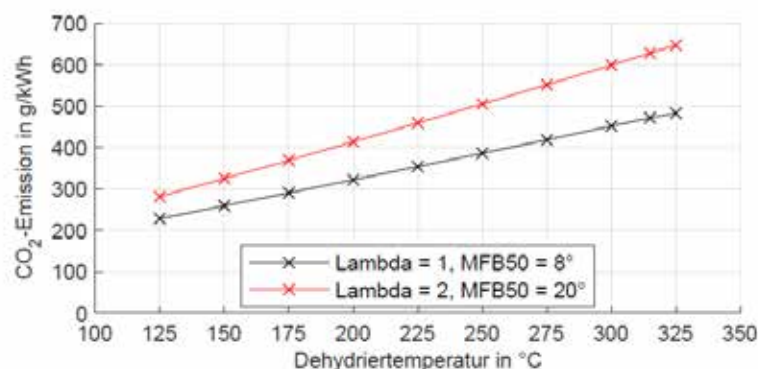


Abbildung 13: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von der Dehydriertemperatur für den wirkungsgradoptimalen Betrieb (rot) und den emissionsminimalen Betrieb (schwarz)

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 CO₂-Emissionen mit der Dehydriertemperatur.

Anstelle des geplanten Wärmeübertragers für das LOHC am Motorpüfstand wird derzeit 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 soll der Dehydrierreaktor dieses Prüfstandes direkt in den Abgasstrang des Stromerzeugers integriert werden. So kann eine ursprünglich nicht geplante Symbiose zwischen den Teilprojekten geschaffen werden und es kann im laufenden Motorbetrieb vollumfänglich dehydriert werden.

Der zentrale, das Projekt bearbeitende Mitarbeiter ist Alexander Neubauer (geb. Durst). Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an den Prüfständen und in der Messtechnik haben im Projektjahr 2019 Lukas Weiß, Bastian Lehnert und Lukas Strauß die Arbeiten wesentlich unterstützt.

4 Schlussworte

Im zurückliegenden Jahr konnten beachtliche Fortschritte im Projekt Speicher B erzielt werden. Es wurde insbesondere in Form von Demonstrationsanlagen und Analysetechnik nachhaltige Infrastruktur geschaffen, die den wissenschaftlichen Output in der verbleibenden Förderzeit und darüber hinaus katalysieren wird. Ebenso nimmt das interdisziplinäre Speicherlabor im „Speicherhaus“ Form an, so dass 2020 mit den ersten Ergebnissen der Demonstrationsanlagen gerechnet werden kann.

Nicht zuletzt die Zahl der hochrangigen Publikationen, die in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Institut für erneuerbare Energien Erlangen-Nürnberg erreicht wurde, zeigt, dass das Projekt Speicher B wissenschaftlich am Standort und im Raum Nürnberg-Fürth-Erlangen gut vernetzt ist.

Besonders im Bereich der Prozessentwicklung und Systemintegration wird deutlich, wie vielseitig LOHC-Anlagen zukünftig eingesetzt werden könnten. Von der emissionsreduzierenden Co-Feuerung bis zur H₂-Tankstellenversorgung, Bayerns Energie- und Wasserstoffversorgung könnte langfristig auf LOHC-Technologien aufbauen, die maßgeblich am Energie Campus Nürnberg erforscht wurde.

5 Vorträge & Poster 2019

- [1] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Dehydrogenation of a chemical hydrogen carrier using a porous media burner. 9th European Combustion Meeting, Lissabon, 14.-17.04.2019 (Poster)
- [2] J. Bollmann, N. Schmidt, L. Zigan, S. Will. Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers unter Verwendung eines Porenbrenners. Deutscher Flammentag, Bochum, 17.-18.09.2019 (Poster)
- [3] 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, 30.09.- 02.10.2019 (Vortrag)
- [4] 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, 05.12.2019 (Vortrag)
- [5] 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 (Poster)
- [6] 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
- [7] 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

- [8] 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

6 Veröffentlichungen 2019

- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] K. Müller, S. Thiele, P. Wasserscheid, Evaluations of Concepts for the Integration of Fuel Cells in Liquid Organic Hydrogen Carrier Systems. *Energy Fuels* 33, 10324, 2019
- [14] J. Bollmann, L. Zigan; S. Will. Dehydrogenation of a chemical hydrogen carrier using a porous media burner. *Proceedings of the European Combustion Meeting 2019*.
- [15] J. Bollmann, N. Schmidt, L. Zigan, S. Will. Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers unter Verwendung eines Porenbrenners. Tagungsband 29. Deutscher Flammentag, Bochum 2019.

Beiträge sind entsprechend ihrem Impact-Factor nach InCites Journal Citation Reports von Clarivate Analytics (jcr.clarivate.com) sortiert. Die Reihenfolge ist analog der SJR-Bewertung

7 Patente 2019

A. Bösmann, P. Preuster, P. Wasserscheid, D. Geburtig. Verfahren und Vorrichtung zum Dehydrieren eines Wasserstoffträgermedium



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854-9120
Fax: +49 911/56854-9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Unterstützt durch:



Wirtschaftsreferat

Gefördert durch:



Impressum

Redaktion/Herausgeber:
Energie Campus Nürnberg

Anschrift:
Energie Campus Nürnberg, Geschäftsstelle
Fürther Str. 250, „Auf AEG“, 90429 Nürnberg
Telefon: 0911 / 56854 9120
Fax: 0911 / 56854 9121
Mail: info@encn.de
www.encn.de

Gestaltung:
Energie Campus Nürnberg
Datenstand: 31.12.2019

© Bildrechte:
EnCN, EnCN/Kurt Fuchs, FAU, TH-Nürnberg,
Fraunhofer IISB, Hochschule Ansbach



**ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG**

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854-9120
Fax: +49 911/56854-9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Gefördert durch:

Unterstützt durch:



Bayerische Staatsregierung



Wirtschaftsreferat