



FORSCHUNGSBERICHT

2018



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

FORSCHUNGSBERICHT

2018

Gegründet 2011.

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

Denken. Forschen. Handeln.

Vorwort



Bis 2022 will die Bundesrepublik aus der Atomenergie aussteigen, bis 2038 aus der Kohle. Die Beschlüsse der Bundesregierung sind Chance und Herausforderung zugleich für die Wissenschaftler am Energie Campus Nürnberg. Was bedeutet das Ende von Kernenergie und Kohle für den Strompreis, die Klimaziele der Bundesregierung und die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft? Welche neuen Technologien sind notwendig und wann sind sie einsatzbereit? Welche Geschäftsmodelle ergeben sich in den städtischen Quartieren und im ländlichen Raum? Und wie gelingt ein effizientes Zusammenspiel von Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor? Wir sind am EnCN ideal aufgestellt, um diese Fragen aus der Sicht verschiedener Disziplinen zu beleuchten, die Perspektiven zusammenzuführen und Lösungen gemeinsam mit Wirtschaft und Politik zu erarbeiten. Damit beleuchten wir nicht nur die großen Fragen der Energiepolitik. Wir zeigen auch, was die Entwicklungen für Bayern bedeuten, was sich ändern wird und welche Chancen sich daraus ergeben.

Der Energie Campus Nürnberg hat sich seit seiner Gründung im Jahr 2011 zu einer verbindlichen Forschungskooperation entwickelt – über die Grenzen von Institutionen und wissenschaftlichen Disziplinen hinweg. Die Metropolregion Nürnberg, seit jeher ein deutschlandweit herausragender Standort für die Energiewirtschaft, ist mittlerweile zu einem weithin sichtbaren Zentrum der Energieforschung geworden. Der Energie Campus bündelt die Kompetenz von sieben renommierten Forschungseinrichtungen und vereint nachgewiesene Exzellenz in der Forschung entlang der Kompetenzfelder der ansässigen Unternehmen. Durch den gemeinsamen Standort und die allen Partnern zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten gelingt der Austausch nicht nur über die Institutionengrenzen hinweg. Auch die Bürgerinnen und Bürger erreichen wir mit unseren Themen in vielfältigen Veranstaltungsformaten.

Im zweiten Jahr nach der Neuaufstellung und Fokussierung in seiner zweiten Förderphase hat sich der EnCN dynamisch weiterentwickelt. Zahlreiche Ausgründungen, zum Beispiel Automatic Research oder Ceus Systems, setzen die Forschung am EnCN in vielversprechende Geschäftsmodelle um. Eine besondere Aufmerksamkeit wurde im Jahr 2018 den Forschern Peter Wasserscheid und Wolfgang Arlt zusammen mit dem Geschäftsführer des gemeinsamen Startups Daniel Teichmann

zuteil, deren Entwicklung im Bereich der LOHC-Technologie es in die Endrunde des Deutschen Zukunftspreises geschafft hatte. Ein Highlight des zurückliegenden Jahres waren auch die Verlängerung des SFB Transregio „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken“ unter der Leitung des Mathematikers Alexander Martin. Die Technische Hochschule Nürnberg erhielt im Rahmen der Initiative „Innovative Hochschule“ eine Förderung für ihr neues LEONARDO – Zentrum für Kreativität und Innovation. Ebenfalls erfolgreich war die THN gemeinsam mit dem ZAE bei der Einwerbung des EU-Projekts Fassade³. Nicht nur im Bereich der Wissenschaft und des Technologietransfers, sondern auch in der Politikberatung ist der EnCN bestens aufgestellt. So wurden im Jahr 2018 EnCN-Forscher in verschiedene renommierte Beratungsgremien auf Bundes- und europäischer Ebene berufen. Erfolg und Herausforderung zugleich ist die Berufung verschiedener Nachwuchswissenschaftler der ersten Stunde auf Professuren im In- und Ausland. Um deren Bindung an den EnCN zu erhalten wurde ein Fellowship-Programm ins Leben gerufen, das auch über die Alumni hinaus unser nationales und internationales Netzwerk stärken wird. Ein Veranstaltungshighlight 2018 war die vom EnCN mitorganisierte zweite Auflage der iSEnEC mit über 500 internationalen Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. An zwei Tagen diskutierten die Experten, wie die Integration erneuerbarer Energien in das Versorgungssystem wirtschaftlich, sozial und ökologisch sinnvoll gelingen kann.

Im Jahr 2019 stehen weitere wichtige Entwicklungen bevor. Neue Impulse sind zu erwarten durch die Schaffung von vier Tenure-Track Professuren an der FAU Erlangen-Nürnberg im Bereich der Energieforschung sowie durch 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“, die im Frühjahr 2019 ihre Arbeit aufnehmen wird.

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 Industrieffizienz, 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.

Am Standort des EnCN „Auf AEG“ ist 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) und Unternehmen aus der Energiebranche angehören. Auch über den Standort hinaus hat der EnCN ein starkes Netzwerk, in dem er Wissensaustausch betreibt sowie Veranstaltungen und Forschungsprojekte durchführt.

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

Dezember 2018



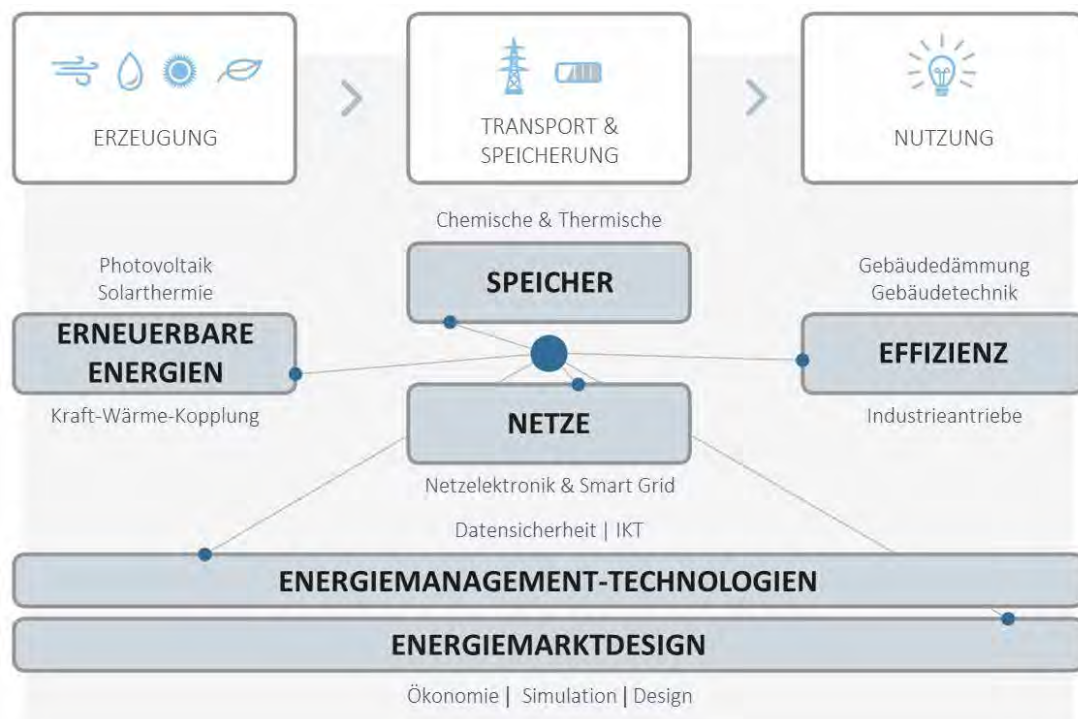
Prof. Dr. Veronika Grimm

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 2018	5
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN	12
Organisation des EnCN	13
Standort und Netzwerk.....	19
Jahresrückblick 2018.....	21
Ausblick 2019	30
EnCN DACH	32
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	41
Projekt Effizienz	42
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN	79
Lehrstuhl für Leistungselektronik	80
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN	83
Projekt Energiemarktdesign	84
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEEN	104
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld	105
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“	118
FORSCHUNGSBEREICH NETZE	122
Projektübersicht Netze	123
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER	128
Projekt Speicher A – Speicher mit Systemrelevanz bis 2022	129
Projekt Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022	155
W1-Professur „Energieinformatik“	171

Highlights 2018

Effizienz



MeViSys: Innovative Schwingungsmesstechnik

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

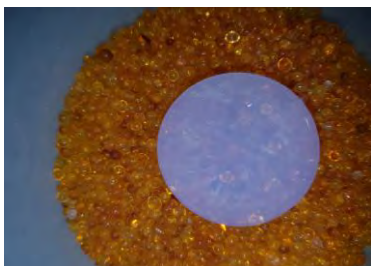
>> Effizienz



Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen

Antriebe mit Mehrphasenmaschinen haben das Potential, die Energieeffizienz weiter zu steigern. Ein erster Prototyp wurde von der Antriebsgruppe am EnCN ausgelegt und in Kooperation mit dem Baumüller Reparaturwerk GmbH aufgebaut. Diese innovative Antriebstopologie steht den Wissenschaftlern nun für Vergleichsmessungen zur Verfügung, um aufgestellte Berechnungsmodelle verifizieren zu können und den Einsatz im industriellen Umfeld voranzutreiben.

>> Effizienz



Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele

Um die Wärmedämmung von Gebäudehüllen weiter zu verbessern, wurden Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogel-Monolithe hergestellt, mit dem Ziel, diese als neuartige Dämmstoffe in Massiv-Wandbaustoffe zu integrieren. Die Rohdichten der Silica-Aerogele liegen zwischen 1 bis 500 mg/cm³. Die Kombination aus Nanoporosität und geringer Dichte des Dämmstoffs führt zu äußerst niedrigen Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda = 0,014$ bis 0,03 W/mK.

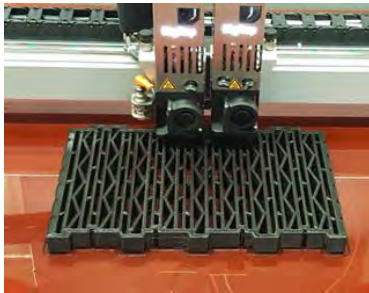
>> Effizienz



Verbesserung der Wärmedämmung von Mauerziegeln durch Absenkung der Wärmestrahlungsverluste

Im Rahmen einer Kooperation mit der Mauerziegelindustrie erfolgt die Ausrüstung der inneren Oberflächen der Ziegel-Lochgitter mit einer Wärmedämmbeschichtung. Während die nicht beschichteten Ziegeloberflächen Emissionskoeffizienten zwischen 0,94 bis 0,96 aufweisen, führt die Beschichtung zu einer Reduzierung der Emissionskoeffizienten auf 0,185 bis 0,30, entsprechend einer Absenkung um bis zu 80,8 %. Der Effekt führt zu einer Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten und damit zur Verbesserung der Wärmedämmung um bis zu 27,5 %.

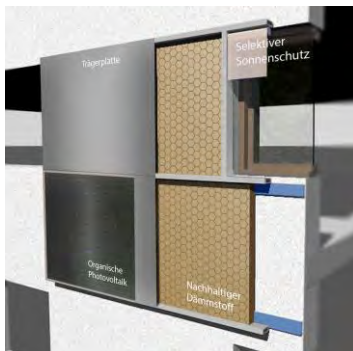
>> Effizienz



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

Mittels Finiten Elemente Methoden erfolgt die Optimierung von Mauerziegeln in Bezug auf Wärmedämmung und Schallschutz. Mittels nachgeschaltetem 3D-Druck werden „Ersatzziegel“ aus Polymilchsäure additiv gefertigt. Durch angepasste thermische Leitfähigkeit der Polymilchsäure können die „Ersatzziegel“ im Wärmeprüfstand getestet werden. Es resultiert eine enorme Zeit- und Kosten-Einsparung bei künftigen Ziegelentwicklungen.

>> Effizienz



Fassade3: Entwicklung eines multifunktionalen Fassadenelementes mit hohem Vorfertigungsgrad

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Forschungsprojekts „Fassade³“ wird in einem interdisziplinären Verbund, u. a. in Kooperation mit dem ZAE Bayern, ein multifunktionales Fassadenelement entwickelt. Dabei liegt der Fokus auf der (Weiter-)Entwicklung innovativer Komponenten. Zur Aktivierung der Gebäudehülle werden organische Photovoltaikzellen genutzt. Für die Gebäudedämmung werden größtenteils nachwachsende Rohstoffe verwendet. Zur Steuerung eines selektiv beschichteten Sonnenschutzes und der Heizung ist der Einsatz einer modellprädiktiven Regelung geplant. Demonstrationsziel ist die Elementfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude in Kitzingen zu installieren.

>> Effizienz



Monitoring der Herzo Base – Energiespeicherhäuser

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ wurde bis Anfang 2018 ein Reihenhauskomplex aus acht hochgedämmten Ziegelhäusern fertiggestellt und von den Besitzern bezogen. Im Januar 2018 startete ein Intensiv-Monitoring der innovativen Baustoffe und Wärmebrücken in den Gebäudehüllen sowie der neuartigen Anlagentechnik.

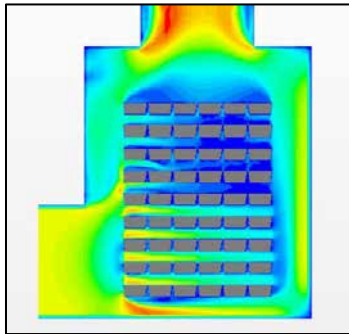
>> Effizienz



Mit einem digitalen Produktionsabbild zu mehr Energieeffizienz

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

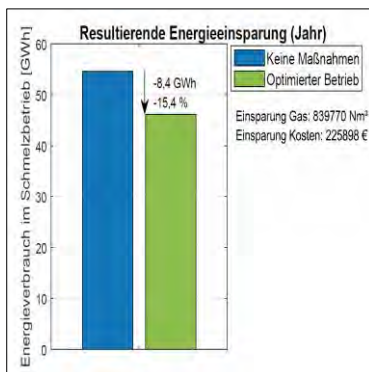
>> Effizienz



Abwärmenutzung durch Materialvorwärmung in speziellen Vorwärmkammern

Eine bereits in der Praxis eingesetzte Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz in Druckgussbetrieben ist die Vorwärmung von Aluminiummasseln in Vorwärmkammern. Durch die Vorwärmung der Masseln verringert sich die zum Schmelzen benötigte Energie sowie die Schmelzdauer. Das Kompetenzzentrum Industrielle Energieeffizienz (KIEff) hat anhand von Strömungssimulationen gezeigt, dass mit einer optimierten Anordnung des Masselpaketes eine Verkürzung der Aufwärmdauer um bis zu 22 % erreicht wird.

>> Effizienz

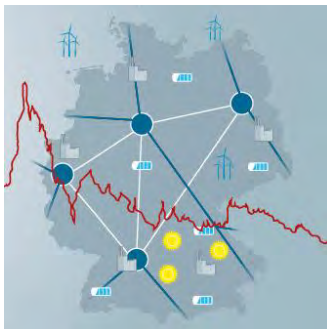


Online-Demonstrator zur Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

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

>> Effizienz

Energiemarktdesign



Marktdesignanalysen mit dem GATE-Modell

Mit Hilfe der Kalibrierung des „Generation And Transmission Expansion“ (GATE) Models für den deutschen Strommarkt für das Jahr 2035 kann gezeigt werden, dass verschiedene Anpassungen des Marktdesigns, z.B. die Einführung einer zweiten deutschen Preiszone oder die systemdienliche Abregelung von Erneuerbaren Energien bei negativen Strompreisen und beim Engpassmanagement, zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und zu Einsparungen beim Netzausbau führen können.

>> EMD



Endogene Preiszonen im Strommarkt

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

>> EMD



© Shutterstock 664440838

Regulatorische Unsicherheit im Strommarkt

Es wird untersucht, welche Auswirkungen regulatorische Unsicherheit auf Investitionsanreize in Erzeugungs- und Übertragungskapazität haben. Dabei wird insbesondere eine mögliche Einführung von Preiszonen als Quelle der Unsicherheit berücksichtigt. Es zeigt sich, dass schon eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Einführung von Preiszonen zu veränderten Investitionsentscheidungen führt. Unsicherheit hat dabei Einfluss auf den Netzausbau, die regionale Verteilung von Investitionen in Erzeugungskapazität, sowie auf den Technologiemix.

>> EMD



© Shutterstock 131120717

Theoretische Analysen zur Eindeutigkeit von Strommarktgleichgewichten

Für die Entwicklung der mathematischen Lösungsverfahren zur Analyse von Strommarktmodellen sind Erkenntnisse über theoretische Eigenschaften des Marktgeschehens wie beispielsweise die Eindeutigkeit von Gleichgewichten von entscheidender Bedeutung. In ihrer Masterarbeit analysierte die jetzige EnCN-Mitarbeiterin Vanessa Krebs diese Gleichgewichte für Marktdesigns, die explizit die Netzphysik oder Transportkosten beachten. Diese Abschlussarbeit von Frau Krebs erhielt den EnCN-Energiepreis 2017 und mündete in zwei in hochrangigen internationalen Fachzeitschriften veröffentlichten Publikationen und einer weiteren Arbeit, die sich gerade in der Begutachtung befindet.

>> EMD



© Shutterstock 133014653

Flexible Verbraucher im deutschen Strommarkt

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

>> EMD



© Shutterstock 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



© Shutterstock 9623992

Robuste Durchmesserwahl für Pipelinenetzwerke

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

>> EMD



Speicherbetrieb und Entflechtung auf Verteilernetzebene

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

>> EMD



Gouvernance-Struktur bei Pilotprojekten

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

>> EMD



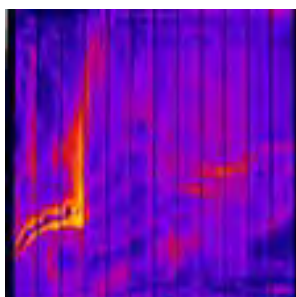
© Shutterstock 765921106

Einfluss von Strompreisen und Marktdesign auf die Herstellung von electric fuels

Electric fuels sind strombasierte Kraftstoffe, die als CO₂-neutrale Alternative zu konventionellen Erdölprodukten wie Benzin, Diesel oder Kerosin eingesetzt werden können. Die Stromkosten sind ein besonders starker Treiber der Herstellungskosten von electric fuels, weshalb den Strompreisen und dem Strommarktdesign eine herausragende Bedeutung zukommt. Unter Verwendung der Strommarktmodellierung aus dem EMD Projekt konnte im Forschungsbereich Speicher gezeigt werden, dass die Herstellung kleinerer Mengen an Kraftstoff in Deutschland, bei der Annahme regional differenzierter Preise, wettbewerbsfähig zum Import der electric fuels aus Ländern mit exzellenten Bedingungen für erneuerbare Energien sein kann.

>> EMD /Speicher

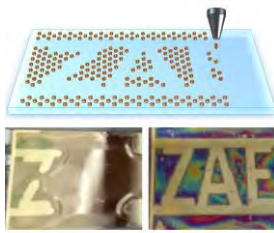
Erneuerbare Energien



Elektrolumineszenz an Semitransparenten OPV Modulen

Während Photolumineszenz als effektives Tool zur Prozesskontrolle eingesetzt wird, rückt die Stabilität organischer Solarmodule für Fassadenintegration zunehmend in den Mittelpunkt. Elektrolumineszenzmessungen erlauben eine zerstörungsfreie Analyse der Qualität von Elektronen und Loch transportierenden Schichten sowohl bei neuen Bauteilen, als auch in-Situ während des Betriebs.

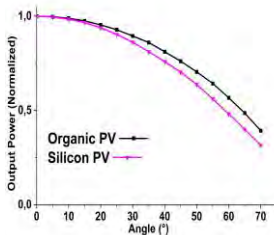
>> EET



2D-Strukturierung funktionalisierter Oberflächen mittels Ink Jet-Druck

Durch Ink Jet-Druck isolierter Punkte („Pinning Centers“) des funktionellen Materials und nachfolgende vollflächige Beschichtung lassen sich auch ansonsten schwer zu benetzende Oberflächen mit optoelektronischen Funktionen versehen. Durch Ausnutzung von Be- und Entnetzungen werden 2D-Strukturen im μm -Bereich erzeugt.

>>EET



Effizienz organischer Photovoltaik (PV)-Module für Fassadenintegration

Die jährliche Energieernte vertikal montierter PV-Module entscheidet über die Wirtschaftlichkeit von PV-Fassaden. Organische PV-Module sind Si-Modulen hinsichtlich bestimmter Merkmale überlegen, bspw. ihre Leistung ist weniger winkel- und temperaturabhängig.

>> EET



Nanokristalltinten für die druckbare Elektronik

Nanokristalltinten, die bei tiefen Temperaturen verarbeitet werden können, ermöglichen es, elektronische Bauteile energieeffizient herzustellen. Hier wurden Nanokristalltinten eingeführt, die es erlauben, Photodetektoren für den infraroten Spektralbereich zu drucken. Dadurch können Materialkosten als auch der Aufwand für die Herstellung minimiert werden. Grundlage für diese Nanokristallelektronik sind Tinten, die nicht nur die erforderlichen elektronischen Eigenschaften gewährleisten, sondern auch druckbar sind. Während es einige Metalltinten auf dem Markt gibt, die dies gewährleisten, sind Halbleitertinten erst im Entwicklungsstadium. Eine Prototypentinte aus Bleisulfid Nanokristallen wurde hier demonstriert.

>> EET

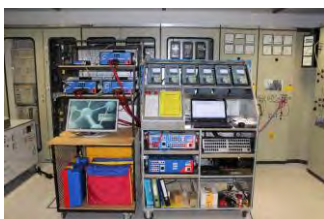
Netze



Versuchsanlage 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 sinnvollen Kombination (Hybridspeicher) im netzgekoppelten Betrieb und im Inselnetz.

>> Netze

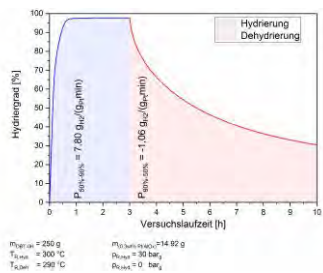


Erfolgreicher Projektabschluss NETZ:KRAFT

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

>> Netze

Speicher



Weiterentwicklungen in der Katalysator-Technologie

Am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik von Prof. Peter Wasserscheid konnte die Katalysator-Technologie für die Dehydrierung flüssiger chemischer Wasserstoffträger wesentlich vorangetrieben werden. Mit dem neuen Katalysator lässt sich die Hydrierung sehr schnell bei Temperaturen oberhalb von 300 °C katalysieren. Der Katalysator ist ebenfalls für die Dehydrierung optimiert und daher ideal für das oneReactor-oneTemperature-Konzept

[>>Speicher](#)



4th Nuremberg Workshop on Methanation and 2nd Generation Fuels

Der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl veranstaltete am 24.-25. Mai 2018 zum vierten Mal einen Workshop zum Thema Substitute Natural Gas (SNG) und synthetische Kraftstoffe. Dabei diskutierten 80 internationale Gäste die aktuellen Herausforderungen bei der Produktion von synthetischen Kraftstoffen. Dies umfasste auch die Präsentation von Ergebnissen zu aktuellen Pilotprojekten, u.a. von GoBiGas - der weltweit größten biomass-to-SNG Anlage. Aktuelle Ergebnisse aus der Grundlagenforschung, z.B. mit Bezug zur biologischen Methanisierung und Industrieanwendungen wie Clariant's Bio-Ethanolproduktion stellten weitere Schwerpunkte dar.

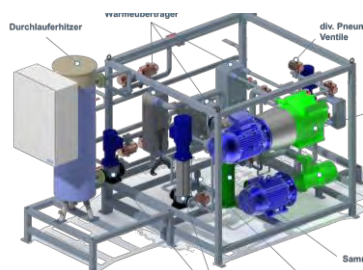
[>>Speicher](#)



Reaktorkonzept für dynamische Synthesen als Grundlage für neues EU-Projekt

Der Research Fund Coal and Steel (RFCS) der Europäischen Union bewilligte 2018 ein neues Forschungsvorhaben zur Integration erneuerbarer Energien in integrierte Stahlwerke. Als eine der wesentlichen Innovationen kommt dabei das im EnCN entwickelte Heatpipe-gekühlte Reaktorkonzept zum Einsatz. Es soll hochdynamisch die im Stahlwerk der Voestalpine in Linz entstehenden Kuppelgase aus der Stahlproduktion mit erneuerbarem Wasserstoff „methanisieren“. Das EU-Projekt mit einem Budget von 3,3 Mio. Euro wird vom Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl) koordiniert.

[>>Speicher](#)



Wie speichert man effizient Strom in heißem Wasser?

Heißwasserspeicher kennen viele nur aus dem heimischen Heizungskeller. In diesem Projekt gehen die Forscher einen Schritt weiter und zeigen an einer Pilotanlage die Stromspeicherung in einem thermischen Druckwassertank. Das Konzept hierfür basiert auf einer hybriden Anlage, die einen Wärmepumpen-Prozess und einen ORC-Prozess vereint. Die Konzeptionierung und Anlagenaufstellung konnte 2018 abgeschlossen werden. Der 20 kW_{el} Prototyp wird 2019 im EnCN-Speicherhaus errichtet.

[>>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 hinzugekommen.

 FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Eine der größten deutschen Universitäten Volluniversität mit einer starken Technischen Fakultät Mehr als 39.600 Studierende
 TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG GEORG SIMON OHM	Technische Hochschule Nürnberg Eine der größten Hochschulen für angewandte Wissenschaften Mehr als 13.000 Studierende
 Fraunhofer IIS	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Angewandte Forschung und Entwicklung für integrierte Schaltungen, Sensorik, eingebettete Systeme, IKT und Systemarchitekturen
 Fraunhofer IISB	Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie IISB Angewandte Forschung und Entwicklung für Leistungselektronik Mikro- und Nanoelektronik, Energietechnik, Elektromobilität Materialien für Elektronik und Photovoltaik
 Fraunhofer IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Angewandte Forschung und Entwicklung auf den Gebieten Akustik, Bauchemie, Baubiologie, Hygiene, Energiesysteme, Hygrothermik, Ganzheitliche Bilanzierung, Raumklima und Wärmetechnik Im Besonderen Systemintegration und Energieeffizienz in Gebäuden
 ZAE BAYERN	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. ZAE Seit 1991 angewandte Energieforschung für Bayern Materialforschung, Komponentenentwicklung und Systemoptimierung
 HOCHSCHULE ANSBACH	Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach Fundiertes und praxisorientiertes Studienangebot mit ausgeprägten Schnittstellen zur Praxis über Kompetenz- und Transferzentren

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

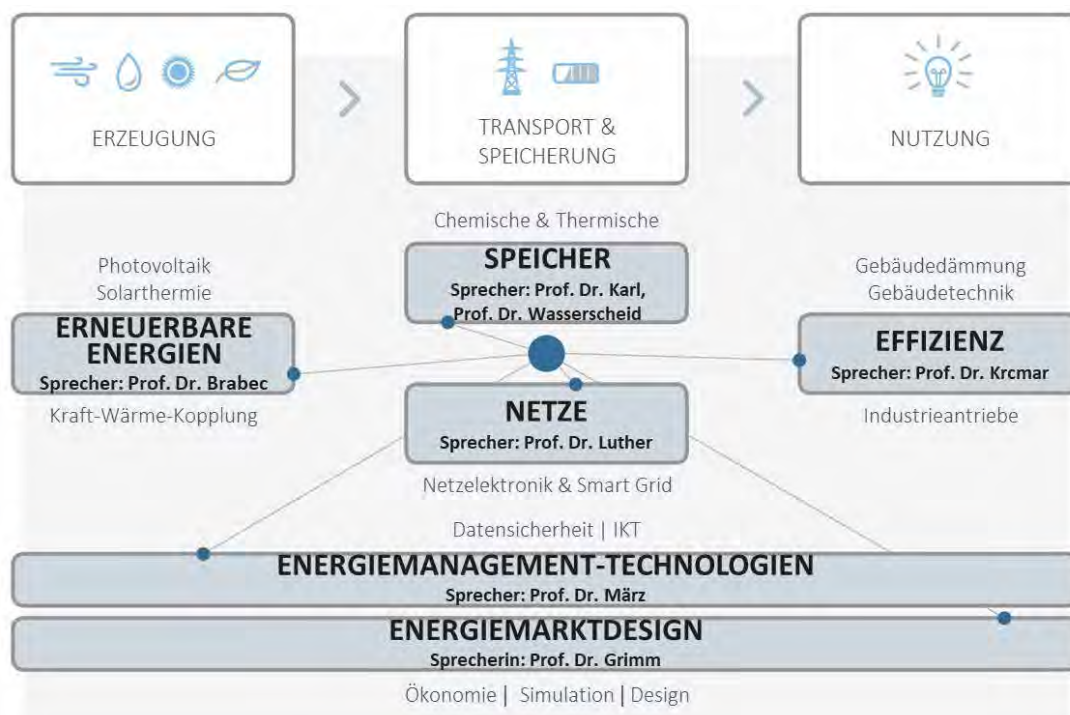


Abbildung 2 – Überblick über die Forschungsbereiche entlang der Energiekette

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 fünf 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 fünf 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 sechs Forschungsbereiche wird aus den Reihen der am Forschungsbereich beteiligten Wissenschaftler ein Sprecher bestellt. Die Ausnahmen bildet der Bereich Speicher, der zwei 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. 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 Pls 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
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 FhG IBP, Energieeffizienz und Raumklima	Effizienz
Prof. Dr. Martin Hartmann	FAU, Professur für Katalyse	Speicher
Dr. Jens Hauch	HI-ERN	Erneuerbare Energien
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

Name	Institution	Forschungsbereich
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	FAU, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik	Speicher
Michael Neubert	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
Dr. Patrick Preuster	HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Prof. Dr. Marco Pruckner	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Karlheinz Ronge	FhG IIS, Vernetzte Systeme und Anwendungen	Energiemanagement- Technologien
Dr. Lars Schewe	FAU, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Eberhard Schlücker	FAU, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik	Speicher
Prof. Dr. Wolfgang Schlüter	HSA, Kompetenzzentrum für industrielle Energieeffizienz	Effizienz
Prof. Dr. Martin Schmidt	FAU, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik	Energiemarktdesign
Simone Steiger	FhG IBP, Energieeffizienz und Raumklima	Effizienz
Prof. Dr. Peter Wasserscheid	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik HI-ERN, Chemical Hydrogen Storage	Speicher
Prof. Dr. Michael Wensing	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher
Prof. Dr. Stefan Will	FAU, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik	Speicher
Prof. Dr. Gregor Zöttl	FAU, Professur für Volkswirtschaftslehre	Energiemarktdesign, Speicher

Geschäftsstelle

Zur Koordination ihrer Aktivitäten und zur Unterstützung der Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und der Wissenschaftlichen Leitung selbst, hat der EnCN eine Geschäftsstelle eingerichtet, welche ebenfalls aus EnCN-Fördermitteln finanziert wird. Diese Geschäftsstelle bildet das „Dach“ des EnCN. Das Dach ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Das Dach bündelt auch die Zusammenarbeit mit dem Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und setzt deren Beschlüsse um. 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. Armin Dietz (THN) Prof. Dr. Albert Heuberger (Leiter des Fraunhofer IIS)
Weitere Vorstandsmitglieder	Dr. Michael Fraas (Wirtschaftsreferent der Stadt Nürnberg)
Geschäftsstelle	Peter Haas (Wirtschaftsförderung der Stadt Nürnberg)

Lenkungsausschuss

Der Lenkungsausschuss besteht aus je einer Vertreterin bzw. einem Vertreter der Leitungen der Partnerorganisationen 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

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.

Mitglieder des Fachbeirats	Dr. Reinhold Achatz – ThyssenKrupp AG Dr. Michael Fraas - Wirtschaftsreferat der Stadt Nürnberg Josef Hasler – N-ERGIE AG Prof. Dr. Rolf Hellinger - Siemens AG Prof. Dr. Claudia Kemfert – DIW Berlin Prof. Dr. Leo Lorenz – European Center for Power Electronics Prof. Dr. Joachim Luther –Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Dirk von Vopelius– IHK Nürnberg für Mittelfranken Prof. Dr. Christoph Weber – Universität Duisburg-Essen Prof. Dr. Eckhard Weidner – Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT Prof. Dr. Dirk Westermann – 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. 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 Jahresbericht.

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 01.01.2018 bis 31.12.2018. Die Jahresberichte für die Jahre 2011 bis 2017 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 2018 über 70 Workshops, Seminare, Vorlesungen, Diskussionsrunden und Informationsveranstaltungen statt.

Die Partner am EnCN haben seit Beginn der zweiten Förderphase insgesamt ca. 13,7 Mio € (gegenüber 4 Mio. € 2017) an Drittmitteln eingeworben. Diese Mittel verteilen sich auf fast 80 einzelne Projekte mit insgesamt mehr als 150 Partnern aus Industrie und Wissenschaft. In der zweiten Förderphase wurden bislang 9 Patente angemeldet.

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 3 – Der EnCN befindet sich in der Nürnberger Weststadt, auf dem ehemaligen AEG Gelände, direkt an der Fürther Straße.

Nach dem im 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, 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.



Abbildung 4 – Das EnCN Hauptgebäude bietet auf 5 Etagen mit 5000qm Fläche Raum für 150 Forscher und für Veranstaltungen mit bis zu 170 Besuchern.

Die Region

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

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

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

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 5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Netzwerkpartner.

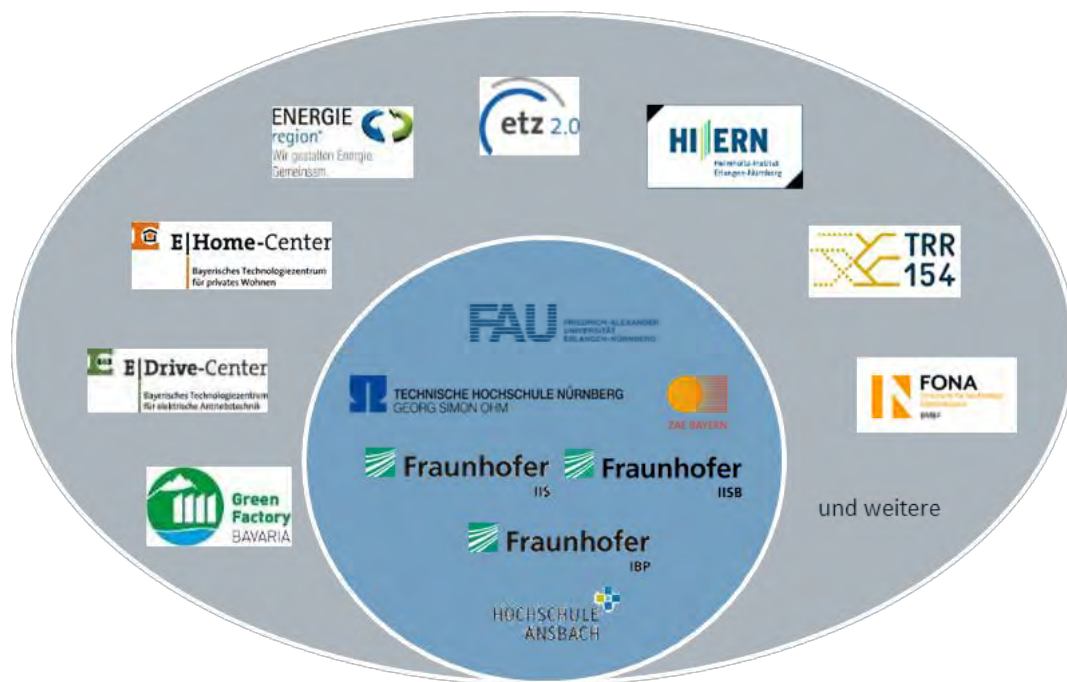


Abbildung 5 – Mit dem EnCN vernetzte Energieprojekte und -initiativen

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

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

Jahresrückblick 2018

Veranstaltungen

Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft

Der EnCN war vom 23.01. bis 25.01. wieder auf der Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft mit einem Ausstellungsstand vertreten. In zahlreichen Gesprächen konnten die teilnehmenden EnCN-Wissenschaftler neue Kontakte knüpfen. Wie im Vorjahr lag der Interessensschwerpunkt der Besucher am Ausstellungsstand vor allem bei den volkswirtschaftlichen Themen.



Abbildung 6 – Impressionen von der Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft

Hannover Messe

Der EnCN war auch 2018 wieder Aussteller auf der Hannover Messe. Auf dem Gemeinschaftsstand von Bayern Innovativ in Halle 2 stellten die EnCN-Wissenschaftler diesmal Neuentwicklungen aus den Bereichen Batterieentwicklung, Netzstabilitätsanalyse und modellbasierter Regelalgorithmen vor. Unter den Standbesuchern war auch die Staatsministerin für Digitalisierung, Dorothee Bär. Sie informierte sich über aktuelle Entwicklungen digitaler Lösungen im Energiebereich. Am traditionellen Bayerntag konnten in den Vorjahren geknüpfte Kontakte zur schwedischen Handelskammer und zum Technologiestandort Wallonien vertieft werden.



Abbildung 7 – Der EnCN-Messestand auf der Hannover Messe

Integration of Sustainable Energy Expo & Conference (iEnEC)

Rund 500 internationale Teilnehmer diskutierten am 17. und 18.07. im Messezentrum Nürnberg, wie die Integration erneuerbarer Energien in das Versorgungssystem wirtschaftlich, sozial und ökologisch sinnvoll vonstattengehen kann. Der EnCN war Mitveranstalter und maßgeblich verantwortlich für die Planung des Konferenzprogrammes, das mit 160 Vorträgen in bis zu 9 parallelen Sessions und einer großen Themenbandbreite eine ideale Möglichkeit zur Diskussion in der notwendigen wissenschaftlichen Tiefe bot. Als Plenarredner konnten Dr. Toni Hofreiter (MdB), Prof. Dr. Robert Schlögl (Direktor am Fritz-Haber-Institut), Dr. Yves Bock (Siemens AG) und Prof. Dr. Peter Dabrock (FAU und Vorsitzender des Deutschen Ethikrates) aus ihren unterschiedlichen Blickwinkeln wertvolle Impulse für die Veranstaltung geben. Sowohl die Wissenschaftliche Leitung als auch der Veranstalter (NürnbergMesse) zogen ein positives Fazit.



Abbildung 8 – Impressionen von der iEnEC

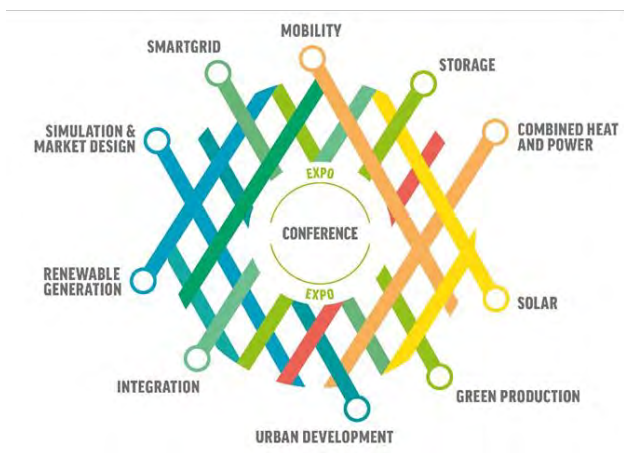


Abbildung 9 – Themenfelder und Partner der iEnEC

EnCN-Sommerkonferenz

Die EnCN-Sommerkonferenz stand unter dem Motto „Was wäre, wenn...“. In einem Workshop bekamen die etwa 80 Teilnehmer die Aufgabe, mit einem Budget von 5 Mio. € für einen Zeitraum von 3 Jahren ein interdisziplinäres Forschungsprojekt zu konzipieren. Herausgekommen sind spannende Projektideen, die anschließend von den Gruppen in einem „Elevator-Pitch“ vorgestellt und von der Wissenschaftlichen Leitung prämiert wurden. Gewonnen haben die Projekte „Clean Ocean Energy“ und „E²-mc, Erneuerbare Energien Mobilitäts-Center“. Auf dem anschließenden Sommerfest konnten die Ideen bei einem Cocktail weiter verfeinert werden.





Abbildung 10 – Impressionen von der Sommerkonferenz

Stadt(ver)führungen

Erstmals bot der EnCN auch Führungen im Rahmen der Nürnberger Stadt(ver)führungen an und öffnete seine Labors für einen Blick hinter die Kulissen. Besichtigt werden konnten die Solarfabrik, das LOHC-Technikum, das hybride Speicherlabor und der Motorenprüfstand. Alle Führungen wurden sehr gut angenommen und waren voll ausgebucht.



Abbildung 11 – Labor(ver)führungen am EnCN

Jahreskonferenz

Wie schon 2017 wurde die Jahreskonferenz in zwei Teilen abgehalten. Vormittags fand die interne Konferenz statt, bei der insgesamt 27 EnCN-Nach Nachwuchswissenschaftler ihre Forschungsarbeiten in 5 parallelen Sessions vor einem internen Publikum vorstellen konnten. Zum öffentlichen Teil der Konferenz konnten wir in diesem Jahr über 130 Teilnehmer begrüßen. Gastreferent Prof. em. Joachim Luther vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme stellte in seinem Vortrag seine Ideen für „Ein integriertes Energiesystem für Deutschland – Transformation der Energieversorgung hin zur Nachhaltigkeit“ vor. Unter dieser Überschrift zeigten im Anschluss auch EnCN-Wissenschaftler aus den verschiedenen Forschungsbereichen aktuelle Entwicklungen und Forschungsergebnisse, die diesen Transformationsprozess mitgestalten können.





Abbildung 12 – Referenten der Jahreskonferenz 2018

Faszination Energie

Der EnCN möchte die verschiedenen Facetten rund um das Thema Erneuerbare Energien einer breiten Öffentlichkeit näherbringen. Im Veranstaltungsformat „Faszination Energie“ bereiten EnCN-Wissenschaftler und Gastreferenten unterschiedlichste Themen für Nichtwissenschaftler auf. 2018 fanden 3 Veranstaltungen statt.

Tabelle 2 – Termine aus der Veranstaltungsreihe „Faszination Energie“

Termin	Thema	Referenten
13.06., Josephs	Energie & Solar The Green New Future in print - Solarfabrik 3.0	Dr. Hans-Joachim Egelhaaf (ZAE)
17.10., EnCN	Energie & Zukunft Ist die Zukunft vorhersagbar?	Dr. Bernd Flessner (FAU)
28.11., EnCN	Energie & Steuern Aktuelle Herausforderungen des Energiesteuerrechts	Prof. Dr. Roland Ismer (FAU) Dr: Johannes Hilpert (Stiftung Umweltenergierecht)





Abbildung 13 – Faszination Energie am EnCN

EnCN Energiepreis

Der 2017 ins Leben gerufene und mit insgesamt 3.000 € dotierte EnCN Energiepreis wurde auch 2018 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 24 Bewerbungen neben vier Masterarbeiten auch die Bachelorarbeiten von Marco Blasius und Florian Pol für den Energiepreis aus. Dies zeigt, dass am EnCN bereits zu diesem frühen Zeitpunkt der Ausbildung mit hoher wissenschaftlicher Qualität gearbeitet wird.

Tabelle 3 – Preisträger des EnCN-Energiepreis 2018

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
Daniela Sappa	Effizienz	Entwicklung eines modifizierten mineralischen Dünnschichtmörtels mit verminderter Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit
Marco Blasius	Speicher	Hydrodynamische Untersuchungen in einem Coldflowmodell eines Plattendehydrierers

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
Christian Novak	Energiemanagement-Technologien	Erstellung eines Simulationsmodells für Gallium-Nitrid Leistungshalbleiterschalter
Florian Pol	Netze	Entwicklung der Steuerungssoftware für ein Lithium-Ionen basiertes Batteriespeichersystem
Philipp Runge	Energiemarktdesign	Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035
Sebastian Strohm	Erneuerbare Energien	Bulk Heterojunction Solar Cells Based on P3HT and the Non-Fullerene Acceptor IDTBR



Abbildung 14 – Gruppenbild der Preisträger des EnCN-Energiepreis 2018

Internetauftritt und Forschungsvideos

In der zweiten Förderperiode haben sich sowohl die Themen - als auch die Projektstruktur verändert. Um dem auch in der Außendarstellung Rechnung zu tragen, wurde die Internetpräsenz des EnCN grundlegend überarbeitet. Dabei wurde ein „Bottom Up“-Ansatz gewählt, bei dem die verschiedenen Forschungsbereiche mit eigenen Redakteuren am Aufbau der Seite beteiligt waren. So wird die Durchgängigkeit von Informationen und aktuellen Meldungen verbessert. Jeder Forschungsbereich hat nun ein eigenes Portal, über das Seitenbesucher die jeweiligen Forschungsarbeiten direkt und unkompliziert erreichen können. Dies wird auch durch die Visualisierung der Energiekette unterstützt. Der neue Internetauftritt ist in deutscher und englischer Sprache verfügbar, um auch Informationen für die vermehrt internationalen Kontakte des EnCN anbieten zu können.

Optisch und technisch bietet der neue Internetauftritt ebenfalls zahlreiche Neuerungen. Die Darstellung und Auffindbarkeit von Projekten, Personen, News, und Veranstaltungen wurde verbessert und an aktuelle Standards angepasst. Es wurde ein Newsletter eingerichtet und Besucher können sich direkt auf der Homepage für EnCN-Veranstaltungen anmelden.



Abbildung 15 – Visualisierung der Forschungsbereiche entlang der Energiekette auf der neuen EnCN-Homepage

In den vergangenen zwei Jahren hat der EnCN zu seinen Forschungsschwerpunkten insgesamt 8 Kurzvideos erstellt, die die aktuellen Forschungsinhalte anschaulich zeigen und mit bereits genutzten oder denkbaren Anwendungsfeldern verknüpfen. Die zwei- bis dreiminütigen Videos sind auf der EnCN-Website und auf Youtube in deutscher und englischer Sprache verfügbar. Für Messen und andere Veranstaltungen gibt es auch Versionen mit Untertitel.

Wissenschaftliche Aktivitäten

Wissenschaftlicher Austausch in der EWL

Um den regelmäßigen wissenschaftlichen Austausch und die Vernetzung zu fördern wurde zum Beginn der zweiten Förderperiode die Erweiterte Wissenschaftliche Leitung (EWL) ins Leben gerufen. Diese setzt sich aus allen Projektkoordinatoren und Teilprojektleitern im EnCN sowie weiteren ausgewählten Wissenschaftlern zusammen. Die EWL trifft sich regelmäßig, um über ausgewählte wissenschaftliche Themen des EnCN zu berichten und zu diskutieren. So sollen Anknüpfungspunkte für themen- und institutionsübergreifende Zusammenarbeit geschaffen werden.

Tabelle 4 – Wissenschaftliche Beiträge in den EWL-Sitzungen

Datum	Forschungsbereich	Vortragstitel	Referent
23.07.	Effizienz	Verbesserte Energieeffizienz in Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch Industrie 4.0-Maßnahmen und Simulation	Prof. Dr. Wolfgang Schlüter
10.09.	Erneuerbare Energien	Solarfabrik der Zukunft	Dr. Hans-Joachim Egelhaaf

Projektseminare

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 5 – Von EnCN-Wissenschaftlern organisierte Workshops, Seminare und Konferenzen

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
22./23.02., Berlin	Workshop Energiemarktmodellierung	Prof. Veronika Grimm, Prof. Gregor Zöttl
08.05., EnCN	Workshop Nanophotonics by Nanocrystals, from integration to single photon operation	Prof. Wolfgang Heiß
26.06., EnCN	Partner-Workshop Wallonien	Dr. Alexander Buchele
17./18.07., NürnbergMesse	iSENEC – Integration of Sustainable Energy Expo & Conference	NürnbergMesse, EnCN, u.a.

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
19.07., EnCN	International Symposium "Organic Photovoltaics - Spectroscopy and Degradation"	Prof. Christoph Brabec
08./09.11.	Konferenz "Gender Economics and the Workplace"	Prof. Veronika Grimm

Berufungen und persönliche Auszeichnungen

Name	Beschreibung
Prof. Wolfgang Arlt Prof. Peter Wasserscheid	Wolfgang Arlt und Peter Wasserscheid wurden gemeinsam mit Daniel Teichmann (Hydrogenious) für den deutschen Zukunftspreis 2018 nominiert. Auch wenn der Preis letztlich an die AiCuris Anti-infective Cures GmbH vergeben wurde, so ist bereits die Nominierung eine große Ehre und Ansporn, die Forschungsaktivitäten im Bereich LOHC intensiv weiter zu treiben.
Prof. Veronika Grimm	Veronika Grimm wurde 2018 in folgende Gremien berufen • Mitglied des Energy Steering Panel of EASAC (European Academies' Science Advisory Council) auf Vorschlag der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina • Mitglied des Sachverständigenrats für Verbraucherfragen am Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz • Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Prof. Martin Schmidt	Martin Schmidt, Inhaber der Professur für Optimierung von Energiesystemen am EnCN nahm einen Ruf auf eine W3-Professur an die Uni Trier an. Er bleibt dem EnCN jedoch als Research Fellow erhalten.

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.

Weitergehende Forschungsprojekte

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

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.

Tabelle 6 – 2018 bewilligte Großprojekte mit Bezug zum EnCN

CGI-Projekt

Gemeinsam mit Designstudenten der THN hat der EnCN ein Projekt durchgeführt, bei dem die Studenten die Aufgabe bekamen, Energiewende und Sektorenkopplung mit Hilfe von computeranimierten Grafiken (CGI) zu visualisieren. Herausgekommen sind insgesamt 22 qualitativ hochwertige und spannende Bilder.

Hieraus wurden 4 Bilder ausgewählt und prämiert, die jetzt dauerhaft im Eingangsbereich des EnCN ausgestellt werden. Der EnCN e.V. belohnt die prämierten Bilder mit jeweils 250 € Preisgeld.

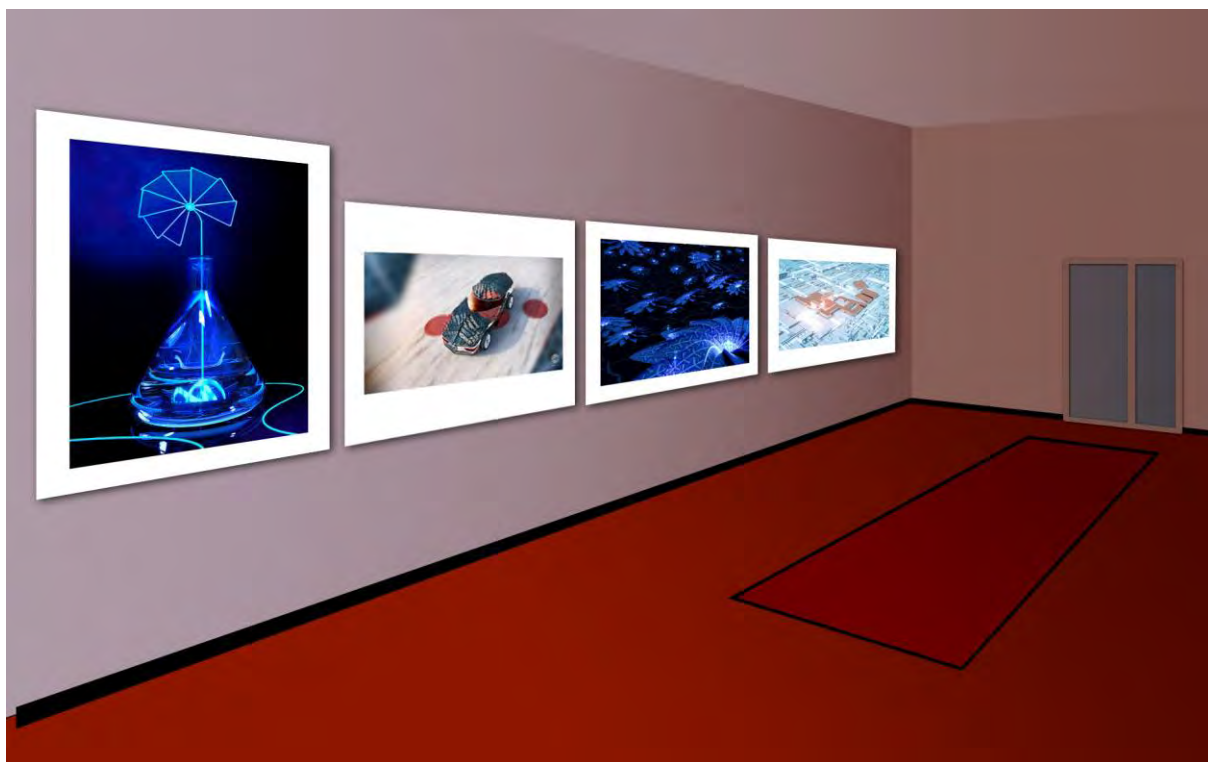


Abbildung 16 – Ausgewählte Bilder für den Eingangsbereich des EnCN

Zusätzlich wurde mit den Bildern ein EnCN-Kalender 2019 gestaltet und gedruckt. Wenige Restexemplare sind noch verfügbar und können über die Geschäftsstelle bezogen werden.



Abbildung 17 – EnCN-Wandkalender 2019

Besucher am EnCN

05.02.	Delegation aus Südafrika
15.02.	Delegation aus Brasilien
28.02.	Delegation aus Sonora/Mexiko, im StMWi
09.03.	Delegation aus China
20.04.	Delegation aus Shaangu/China
26.04.	Delegation aus der Ukraine
29.05.	Delegation aus Bochum
18.06.	Delegation aus Mexiko
19.06.	Delegation aus Mittelamerika
10.07.	Delegation aus Korea
02.08.	Delegation aus Korea
24.09.	Delegation aus Ostafrika
29.09.	Delegation aus Wuhan/China
02.10.	Besuch von Katja Hessel (MdB)
11.10.	Delegation aus Kolumbien
17.10.	Delegation aus China
05.11.	Schulung für MIIT-Delegation aus China

Ausblick 2019

Stärkung des Wissenschaftlichen Nachwuchses

Um den wissenschaftlichen Nachwuchs zu stärken werden im direkten Umfeld des EnCN vier W1-Professuren aus dem vom BMBF geförderten Tenure-Track-Programm (1000-Professoren-Programm) ausgeschrieben. Davon sind zwei im Bereich der Verfahrenstechnik (Forschungsbereich Speicher), eine im Bereich Elektrotechnik (Forschungsbereich Netze) und eine in den Wirtschaftswissenschaften (Forschungsbereich Energiemarktdesign) angesiedelt.

Der Forschungsbereich Energiemarktdesign wird im Jahr 2019 durch eine Nachwuchsforschergruppe des Zentrum Digitalisierung Bayern verstärkt. Dr. Verena Tiefenbeck, bisher Leiterin des „Bits-to-Energy Labs“ an der ETH Zürich, konnte die Nachwuchsgruppe erfolgreich für die FAU einwerben und wird im Frühjahr 2019 von der ETH Zürich an die FAU wechseln.

EnCN Fellowship Programm

Das neu geschaffene Fellowship Programm soll es dem EnCN ermöglichen, Kooperationen mit externen Wissenschaftlern zu stärken und die Kontakte zu ehemaligen Mitgliedern des EnCN nicht abreißen zu lassen. Zu den ersten EnCN Fellows gehören sowohl Nachwuchswissenschaftler, die nach ihrer Zeit am EnCN einem Ruf nach auswärts gefolgt sind, als auch enge Kooperationspartner der Forschungsbereiche, die mit ihren Verbindungen das nationale und internationale Netzwerk des EnCN stärken. Im Jahr 2019 sind weitere Berufungen von EnCN Fellows geplant.

Lange Nacht der Wissenschaften

2019 findet am 19. Oktober wieder die Lange Nacht der Wissenschaften statt. Der EnCN wird auch dieses Mal wieder mit einem umfassenden Vortrags-, Besichtigungs- und Mitmachprogramm seine Forschungsthemen vorstellen.

Weitere Veranstaltungen

Der EnCN wird 2019 im Februar auf der E-world energy & water sowie im April auf der Hannover Messe als Aussteller auftreten. Ziel ist es, die Bekanntheit überregional zu steigern und, Kontakte mit potentiellen Projektpartnern aus Wissenschaft und Industrie zu knüpfen.

Der 5. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop wird am 21. und 22. Februar 2019 am Ifo Institut in München stattfinden. Im Rahmen der jährlichen Treffen wird ein intensiver Austausch und eine Diskussion zu aktuellen Forschungsarbeiten gefördert, insbesondere zwischen dem Energie Campus Nürnberg, der FAU Erlangen-Nürnberg, dem Ifo Institut, der TU München, dem DIW Berlin und der TU Berlin.

Anlässlich des 100-jährigen Bestehens der WiSo organisiert die FAU am 23.05. den 1. Nürnberger Dialog Wirtschaft und Wissenschaft (#NUEdialog). Der EnCN wird sich als Aussteller an der Veranstaltung beteiligen, sowie im Rahmen einer Paneldiskussion zum Thema Mobilitätswende mit den Teilnehmern Dr. Daniel Teichmann (Hydrogenius Technologies GmbH), Prof. Dr. Veronika Grimm (FAU/EnCN), Rainer Kleedörfer (Leiter Unternehmensentwicklung / Beteiligung, N-ERGIE Aktiengesellschaft) und Lorenz Jung (Head of Network Delivery, H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG).



DACH

Projektbericht 2018

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.

Umbau Speicherhaus

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. Die Umbauarbeiten sind größtenteils 2018 abgeschlossen worden, so dass der Aufbau der Forschungsgeräte 2019 starten kann.



Energie Campus Nürnberg Gebäude 13

KONTAKT

Dr. Alexander Buchele
Geschäftsführer



Ioanna Dimopoulou
Assistenz

E-Mail
Info@encn.de

Telefon
+49 911 / 56854 9120

Web
www.encn.de

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

Vernetzung mit externen Projektpartnern

Tabelle 1 – Partner-Workshops und Veranstaltungen für EnCN Wissenschaftler

Datum, Ort	Veranstaltung	Beteiligte EnCN Wissenschaftler
05.06., Mannheim	KickOff Projekt MVV Energie AG	Prof. Alexander Martin, Energiemarktdesign Karlheinz Ronge, Energiemanagement-Technologien
26.06., EnCN	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
09.10., Stuttgart	Besuch Recom Services	Prof. Jürgen Karl, Speicher
23.10., EnCN	Innovationssafari Framatome	Dr. Jens Hauch, Erneuerbare Energien Prof. Peter Wasserscheid, Speicher Dr. Bernd Wunder, Energiemanagement-Technologien

Die Geschäftsstelle koordinierte verschiedene Aktivitäten und Workshops, um EnCN-Wissenschaftler in Austausch mit potentiellen Projektpartnern zu bringen. Ein bereits 2017 initiiertes Kontakt zur MVV Umwelt GmbH führte 2018 zu einem Forschungsprojekt zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen. Bei einem Besuch einer größeren wallonischen Delegation wurden unterschiedliche Forschungsthemen in Round-Table Formaten diskutiert. Vertreter der Geschäftsführung und Bereichsleiter von Framatome haben im Rahmen ihrer Informationssafari den EnCN besucht.



Abbildung 1 – Framatome Innovationssafari am EnCN

EnCN-Sommerkonferenz

Am 26.07. fand die Sommerkonferenz in Form eines Workshops mit Sommerfest statt. Im Workshop erhielten die verschiedenen Gruppen ein fiktives Budget, welches sie für ein zukunftssträchtiges interdisziplinäres Forschungsprojekt ausgeben durften. Das Thema und die Rahmenbedingungen des Projektes wurden dann im Podium vorgestellt. Außerdem hatten alle Beteiligten des EnCN darüber hinaus die Möglichkeit, in ungezwungener Atmosphäre Forschungsthemen zu diskutieren und sich zu vernetzen. Die Gesamtorganisation für diese Veranstaltung wurde von der Geschäftsstelle übernommen.

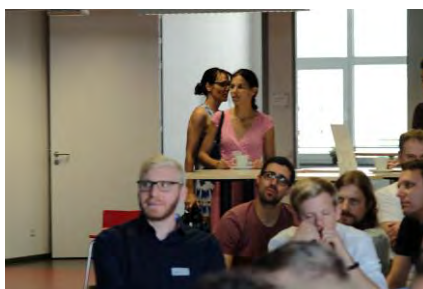


Abbildung 2: Impressionen von der Sommerkonferenz mit Sommerfest

1.2 EnCN-Energiepreis

In Zusammenarbeit mit dem EnCN verlieh der EnCN e.V. 2018 zum zweiten Mal den Energiepreis. Der Preis ist mit insgesamt 3.000 € dotiert und wird für exzellente Abschlussarbeiten aus dem Umfeld des EnCN vergeben. Insgesamt wurden sechs 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. Der Energiepreis soll ab jetzt jährlich vergeben werden. Die Ausschreibung für 2019 läuft bereits.



Abbildung 3: Einladungskarte zur Ausschreibung des Energiepreises 2019

1.3 Öffentlichkeitsarbeit

Veranstaltungen

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit war der EnCN 2018 auf einigen Veranstaltungen aktiv.

- Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft in Berlin: Messestand
- Hannover Messe: Messestand
- iSENEC: Messestand im Ausstellungsbereich und Mitorganisation des Konferenzprogramms
- Bayerischer Energiepreis: Messestand
- Stadtverführungen: Laborführungen im EnCN
- Jahreskonferenz mit Verleihung des EnCN-Energiepreises



Abbildung 4: Bilder vom Bayerischen Energiepreis und der iSENEC

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. Die drei Termine 2018 (Energie & Solar, Energie & Zukunft, Energie & Recht) fanden mit bis zu 70 Teilnehmern guten Anklang. Die Veranstaltungsreihe wird 2019 fortgesetzt

Videos

Die Themenvideos zu den einzelnen Forschungsbereichen des EnCN wurden 2018 fertiggestellt. Die insgesamt acht Kurzvideos werden unter anderem auf der Internetpräsenz und einem Youtube-Kanal gezeigt sowie zur Außendarstellung auf Messen und Veranstaltungen eingesetzt.

EnCN Homepage

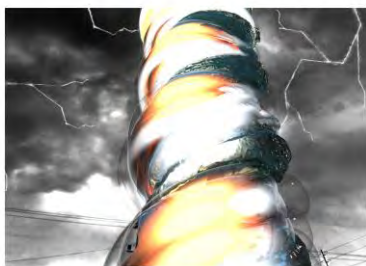
Der EnCN hat 2018 seine Homepage grundlegend überarbeitet, um insbesondere der veränderten Struktur in der zweiten Förderperiode Rechnung zu tragen. Die Geschäftsstelle hat das Gesamtprojekt geführt und dabei vor allem die Arbeit der internen Arbeitsgruppe und der Web-Agentur organisiert.

Die neue Seite ist das Ergebnis eines Bottom-Up-Ansatzes, bei dem von Beginn an Vertreter aus allen Forschungsbereichen an der Konzeption und Umsetzung beteiligt waren. Jeder Forschungsbereich stellt Redakteure für die neue Seite. So wird es zukünftig einfacher, neue Inhalte einzupflegen und die Seiten aktuell zu halten.

Technisch ergeben sich ebenfalls neue Möglichkeiten mit der Umstellung. Im Backend arbeitet eine Nutzerverwaltung, die z.B. für Newsletter oder automatisierte Veranstaltungsanmeldungen genutzt werden kann. Insgesamt wurde die Seite intuitiver gestaltet, insbesondere die Forschungsinhalte sind jetzt leichter zugänglich für Seitenbesucher.

CGI Projekt

In Zusammenarbeit mit der Fakultät der THN entwickelte die Geschäftsstelle ein Projekt, bei dem Energiewende und Sektorenkopplung mittels computeranimierter Grafiken visualisiert werden sollte. 22 Studenten beteiligten sich am Projekt und entwickelten die unterschiedlichsten Ideen und Ansätze. Ausgewählte Bilder werden jetzt im Eingangsbereich des EnCN ausgestellt, außerdem wurde mit den Bildern ein Jahreskalender 2019 gestaltet.



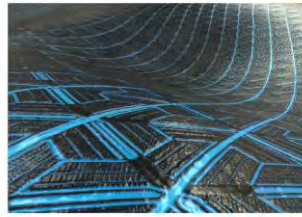


Abbildung 5 – Auswahl CGI-Bilder aus dem THN-Semesterprojekt

1.4 Organisation

Das „DACH“ des EnCN besteht aus vier Mitarbeitern: dem Geschäftsführer Dr. Alexander Buchele, der Assistentin Ioanna Dimopoulou, dem Gebäudemanager Wolfgang Schlaffer und der Projektmanagerin Kristin Zeug. Der langjährige Gebäudemanager Rudolf Heindel ist Ende Mai in den Ruhestand getreten, sein Nachfolger Wolfgang Schlaffer ist seit 01.05. am EnCN angestellt. 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 sowie des Gebäudemanagers konnte dies bereits umgesetzt werden.



Abbildung 6: Mitarbeiter der Geschäftsstelle Energie Campus Nürnberg

2 Schlussworte

2018 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 erzeugen. Dies ist mit den zahlreichen Beteiligungen an überregionalen und internationalen Veranstaltungen 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
15.01.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
01.02.	Seminar	Abschlussveranstaltung CMTS-Seminar
05.02.	Besuch	Delegation aus Südafrika
15.02.	Besuch	Delegation aus Brasilien
21.02.	Workshop	Sitzung des IHK PV-Sachverständigenausschuss
28.02.	Besuch	Delegation aus Sonora/Mexiko, im StMWi
09.03.	Besuch	Delegation aus China
16.03.	Sitzung	Fachbeirat
21.03.	Seminar	Ziegelseminar
12.04.	Workshop	PM-Lounge
20.04.	Besuch	Delegation aus Shaangu/China
23.04.	Seminar	DGS-Seminar
26.04.	Seminar	WGP-Seminar
26.04.	Besuch	Delegation aus der Ukraine
07.05.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
08.05.	Sitzung	Green Economy
08.05.	Workshop	Nanophotonics by Nanocrystals, from integration to single photon operation
14.05.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
29.05.	Besuch	Delegation aus Bochum
04.06.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
08.06.	Sitzung	Vorstand ERN
11.06.	Workshop	Workshop Deutsches Museum Nürnberg
11.06.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
14./15.06.	Workshop	Akademie Tutzing

Datum	Veranstaltung	Titel
18.06.	Besuch	Delegation aus Mexiko
19.06.	Besuch	Delegation aus Mittelamerika
25.06.	Workshop	Energie-Mixxer
26.06.	Workshop	Partner-Workshop Wallonien
04./05.07.	Workshop	Printed Electronics in Medizin und Gesundheitswesen
10.07.	Besuch	Delegation aus Korea
10./11.07.	Seminar	FAPS-Seminar
12.07.	Seminar	ECPE-Seminar
19.07.	Konferenz	Organic Photovoltaics - Spectroscopy and Degradation
23.07.	Workshop	Kick Off mobilInspec
24.07.	Workshop	Startup-Pitch
26.07.	Konferenz	EnCN-Sommerkonferenz
02.08.	Besuch	Delegation aus Korea
09.08.	Pressegespräch	Pressekonferenz Stadtverführungen 2018
13.09.	Seminar	Projektseminar EnBeKa, KaP-Software und Coolplan
18.09.	Sitzung	Green Economy
22.09.	Besuch	Stadtverführungen im EnCN
24.09.	Besuch	Delegation aus Ostafrika
26.09.	Seminar	Ziegelseminar
29.09.	Besuch	Delegation aus Wuhan/China
02.10.	Besuch	Besuch von Katja Hessel (MdB)
10.10.	Seminar	ECPE-Seminar
11.10.	Seminar	Energieeffizienz in der Industrie
11.10.	Besuch	Delegation aus Kolumbien
12.10.	Workshop	Summer School
15.10.	Workshop	EMN-Accelerator Workshop
16.10.	Seminar	Wohnen&Energie
17.10.	Vortrag	Faszination Energie (Energie und Zukunft)
17.10.	Besuch	Delegation aus China
23.10.	Seminar	20 Jahre EEG-Förderung
23.10.	Workshop	Innovations-Safari Framatome
25.10.	Seminar	AWO-Seminar
05.11.	Schulung	Schulung für MIIT-Delegation aus China
15.11.	Workshop	BEEN-I Treffen Energiespeicher
19.11.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
22.11.	Seminar	Seminar DC-Schutzorgane
26.11.	Seminar	Seminar TRR 154
28.11.	Vortrag	Faszination Energie (Energie&Steuern)
10.12.	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG

Datum	Veranstaltung	Titel
13.12.	Konferenz	EnCN-Jahreskonferenz

3.2 Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten, Forschungsthemen und Veranstaltungen war 2018 mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse.

Datum	PRINT Medium	Titel
10.12.2018	Nürnberger Nachrichten	Wohin in Nordbayern
10.12.2018	Nürnberger Zeitung	Wohin in Nordbayern
10.12.2018	Nürnberger Stadtanzeiger	Service
19.11.2018	Nürnberger Nachrichten	Wohin in Nordbayern
19.11.2018	Nürnberger Stadtanzeiger	Service
19.11.2018	Nürnberger Zeitung	Wohin in Nordbayern
16.10.2018	Nürnberger Zeitung	Die NZ präsentiert: Vortragsreihe des Energie Campus Nürnberg
24.09.2018	Nürnberger Zeitung	Drei Tage lang hatten Interessierte die Qual der Wahl: Bei den "Stadt(ver)führungen"
11.08.2018	Nürnberger Nachrichten	Visionen beflügeln die Städte der Zukunft - Stadt(ver)führungen
11.08.2018	Nürnberger Zeitung	Neue Perspektiven auf die Heimat
14.07.2018	Fränkischer Tag / Lokales Obermain	Energieeffizienz in Reih und Glied Wohnprojekt Im Baugebiet "Herzo Base II
13.07.2018	Fränkischer Tag / Lokales Erlangen-Höchstädt	Energieeffizienz in Reih und Glied Wohnprojekt Im Baugebiet "Herzo Base II
15.06.2018	Nürnberger Zeitung / Wissenschaft & Forschung	Skepsis vor der Kamera, doch Zuneigung zu Robotern
11.06.2018	Nürnberger Nachrichten	Wohin in Nordbayern
11.06.2018	Nürnberger Stadtanzeiger	Wohin in Nordbayern
11.06.2018	Nürnberger Zeitung	Wohin in Nordbayern
04.06.2018	Nürnberger Nachrichten	Wohin in Nordbayern
04.06.2018	Nürnberger Stadtanzeiger	Service
04.06.2018	Nürnberger Zeitung	Wohin in Nordbayern
30.05.2018	Nürnberger Zeitung / Hochschule & Wissen	Sind die Besten wirklich die Besten?
14.05.2018	Nürnberger Stadtanzeiger	Service
09.05.2018	Nürnberger Zeitung / Hochschule & Wissen	Alle Termine der Vortragsreihen
09.05.2018	Nürnberger Zeitung / Hochschule & Wissen	Eine Katze hat den Weg zur modernen Physik geebnet Licht hat Kraft.
05.05.2018	Nürnberger Zeitung/Nürnberg	Vortragsreihe "Wissenschaft auf AEG"
23.01.2018	Nürnberger Stadtanzeiger / WIRTSCHAFT	Auf AEG hat neue Mieter

19.01.2018	IZ Aktuell	MIB meldet Vermietungserfolge auf Nürnberger AEG-Areal
Datum	ONLINE Medium	Titel
14.12.2018	inFranken.de	Energie Campus Nürnberg verleiht Nachwuchspreis
30.11.2018	pV magazine	Hydrogenious LOHC-Wasserstofftechnologie: In USA bekannter als in ...
29.11.2018	inFranken.de	Digitale Bilderwelten zeigen Facetten der Energiewende
26.11.2018	EurekAlert	Using fine-tuning for record-breaking performance
06.11.2018	Nordbayern.de	Von der Industriestadt zum Hightech-Standort
19.11.2018	inFranken.de	Nürnberger Bildungskonferenz: Bildung und ...
16.11.2018	inFranken.de	Dr. Fraas: Zukunftsthema Künstliche Intelligenz
31.10.2018	inFranken.de	Erstes Energiewende-Filmfestival
19.10.2018	MarktSpiegel	Vorbilder in Sachen Klimaschutz: Wer wird der nächste energie ...
17.10.2018	inFranken.de	Digital Tech Summit & Hackathon in Nürnberg
10.10.2018	elektroniknet.de	Kreative Ideen für eine umweltfreundliche Stadt
26.09.2018	MarktSpiegel	Deutscher Zukunftspreis nominiert Energie Campus-Forscher
24.09.2018	Bayerischer Rundfunk	25.000 Teilnehmer bei den Nürnberger Stadtverführungen
23.09.2018	Solarify – Energie für die Zukunft	Speicherung
13.09.2018	Informationsdienst Wissenschaft	DRIVE-E 2018: Fünf Preisträger, 50 Studierende, 100 Prozent ...
20.08.2018	donaukurier.de	Blick in die urbane Glaskugel
10.08.2018	MarktSpiegel	Visionäres bei den Stadt(ver)führungen 2018 in Nürnberg und Fürth
27.07.2018	inFranken.de	Leuchtturmprojekt zu Zukunftstechnologien im Einzelhandel
12.07.2018	inFranken.de	Herzo Base hat jetzt acht Energieeffizienzhäuser
11.07.2018	Nordbayern.de	Millionen-Investition: Ausbau der TH Nürnberg ist gesichert
26.06.2018	inFranken.de	Forscher trauern um Lothar Frey
16.04.2018	N-Land.de	Gut für die Umwelt und den Geldbeutel
16.03.2018	MarktSpiegel	Markus Söder zum 11. Bayerischen Ministerpräsidenten gewählt
15.03.2018	Bayerische Staatszeitung	Das BHKW des Jahres steht in Kemnath
17.01.2018	elektroniknet.de	Neuer Regler verteilt Strom einfach und effizient im Netz
15.01.2018	innovations report	Energiewende: Neuer Regler verteilt Strom einfach und effizienter im ...

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

Projektbericht 2018

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.

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.

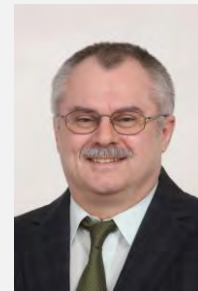
Die Forschungsarbeiten werden dazu beitragen, die Energieeffizienz im Gebäude- und Industriebereich in wenigen Jahren signifikant zu erhöhen.

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 TPJ 1: Energieeffiziente Gebäudehülle

1.1 Entwicklung und Ausrüstung neuer, höchstwärmedämmender Baustoffe mit verminderter Wärmeleitfähigkeit

Einleitung und Motivation

Eine gut gedämmte Gebäudehülle zählt zu den wichtigsten Maßnahmen, um die Energieeffizienz von Wohn- und Nichtwohngebäuden zu verbessern. Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeiten erfolgt die Entwicklung und Ausrüstung von Wandbaustoffen mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften, u.a. von Mauerziegeln, Mauermörteln sowie von Innen- und Außenputzen. Ziel ist insbesondere die 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.

Arbeiten und Ergebnisse

1.1.1 Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente

Gebäude; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik; Prof. Dr. W. Krcmar, M.Eng. N. Wedel und M.Eng. C. Allar

Im Projekt „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaserisolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ (PTJ-Förderkennzeichen: 03SF0543B) erfolgt die Entwicklung und Anwendung neuartiger Dämmstoffe aus nanoskaligen Faserstoffen. Diese werden von einem Projektpartner an der Freien Universität Berlin durch Elektrosponnen hergestellt. Dazu werden Alt-Styropormengen aus dem Baustoff-Recycling verflüssigt und zu Nanofasern und Nanofaser-Vliesen versponnen. Die hergestellten Nanofasern werden im EnCN in Wandbaustoffe integriert mit dem Ziel, die Wärmedämmeigenschaften der Produkte weiter zu verbessern.

Teil 1: Verbesserung der Wärmedämmung von Massivwandbaustoffen

Mit den neuentwickelten Nanofasern und einer neuentwickelten Wärmedämmbeschichtung wurden Versuche durchgeführt, um die Wärmeleitfähigkeit von Ziegelkeramik abzusenken. Ziel war die Verfüllung der Hohlräume im Ziegel mit Nanofasern und zusätzlich die Beschichtung der Nanofasern um den Emissionskoeffizienten abzusenken (Abb. 1, rechts oben). Gezeigt ist eine keramische Ziegelplatte, die in der Mitte, senkrecht zur Wärmestromrichtung, durchgesägt wurde (Abb.1, links oben). Vier Abstandshalter aus Polystyrol sorgen dafür, dass zwischen beiden Ziegelflächen ein Hohlraum mit einer Schichtstärke von 5 mm entstanden ist. Der erzeugte Hohlraum dient der Nachbildung der Zwischenräume eines Lochziegels. Die Wärmeleitfähigkeit der Anordnung mit ungefülltem Hohlraum (Abb. 1, links oben) und einem Abstand der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen von 100 cm² beträgt $\lambda_{10, tr.} = 0,207$ W/mK. Die beiden im Strahlungsaustausch stehenden Ziegeloberflächen wurden mit der einer Wärmedämmbeschichtung ausgerüstet, der Abstand der Ziegeloberflächen mit 5 mm konstant gehalten und die resultierende Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda_{10, tr.} = 0,174$ W/mK (Abb. 1 rechts unten) ermittelt. Danach wurden die beschichteten Ziegeloberflächen mit jeweils einem Polystyrol-Nanofaser-Vlies in einer Materialstärke von jeweils 1 mm auf den Sichtflächen ausgerüstet. In diesem Fall zeigte die Gesamtanordnung eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,163$ W/mK. In einem weiteren Versuch (Abb. 1, rechts oben) wurden die Nanofasern im Vlies ebenfalls mit der Wärmedämmbeschichtung ausgerüstet (Sprühbeschichtung). Die anschließend an der Anordnung gemessene Wärmeleitfähigkeit betrug $\lambda_{10, tr.} = 0,163$ W/mK. Damit wurde die Wärmeleitfähigkeit in Wärmestromrichtung um 21,26 % abgesenkt.

Die im Elektrosponnen-Verfahren hergestellten Polystyrol-Nanofasern haben Durchmesser zwischen wenigen Hundert Nanometern und einem knappen Mikrometer. Die Dichte des hier verwendeten Polystyrol-Nanofaser-Vlies beträgt 0,1 g/cm³. Die hohe Wärmedämm-Wirkung der Nanofaser-Vliese entsteht durch die mikroporösen Hohlräume zwischen den Fasern. Dabei ist die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle innerhalb der Poren größer, als der Porendurchmesser, so dass Platzwechselvorgänge der Gasmoleküle behindert sind. Die Gasmoleküle im Porenraum stoßen daher öfter mit dem porenbildenden Material zusammen, als mit anderen Gasmolekülen innerhalb der Poren (Knudsen-Diffusion). Bedingt durch die zweidimensionale Ausrichtung der Nanofasern im Vlies entsteht eine anisotrope Ausrichtung des Wärmestroms in Faserrichtung. Beim Einbau der Vliese in einen Bau- bzw. Dämmstoff senkrecht zur Wärmestromrichtung wird der Wärmestrom zweidimensional am Wandbaustoff entlang geleitet, so dass in Richtung der Mauerwerksstärke (übliche Wärmestromrichtung) ein deutlich geringerer Wärmestrom fließt.

Die Wärmedämmbeschichtung wurde mit dem Airbrush-Verfahren auf das Ziegelmaterial bzw. auf das Polystyrol-Nanofaser-Vlies aufgetragen. Die REM-Aufnahme der beschichteten Ziegeloberfläche ist dargestellt (Abb. 1, links unten). Die Pigmente in der Wärmedämmbeschichtung haben einen mittleren Durchmesser von 20 µm. Für die Beschichtung wurde ein Leafing-Pigment ausgewählt. Leafing-Pigmente haben die Eigenschaft sich an der Oberfläche des Beschichtungsfilms waagerecht auszurichten. Durch diese Ausrichtung wird eine maximale Reflexion der Strahlung

erreicht, wodurch eine Absenkung des Emissionskoeffizienten erfolgt. Voraussetzung für eine optimale Ausrichtung der Pigmente ist eine möglichst glatte Oberfläche des zu beschichtenden Werkstoffs.

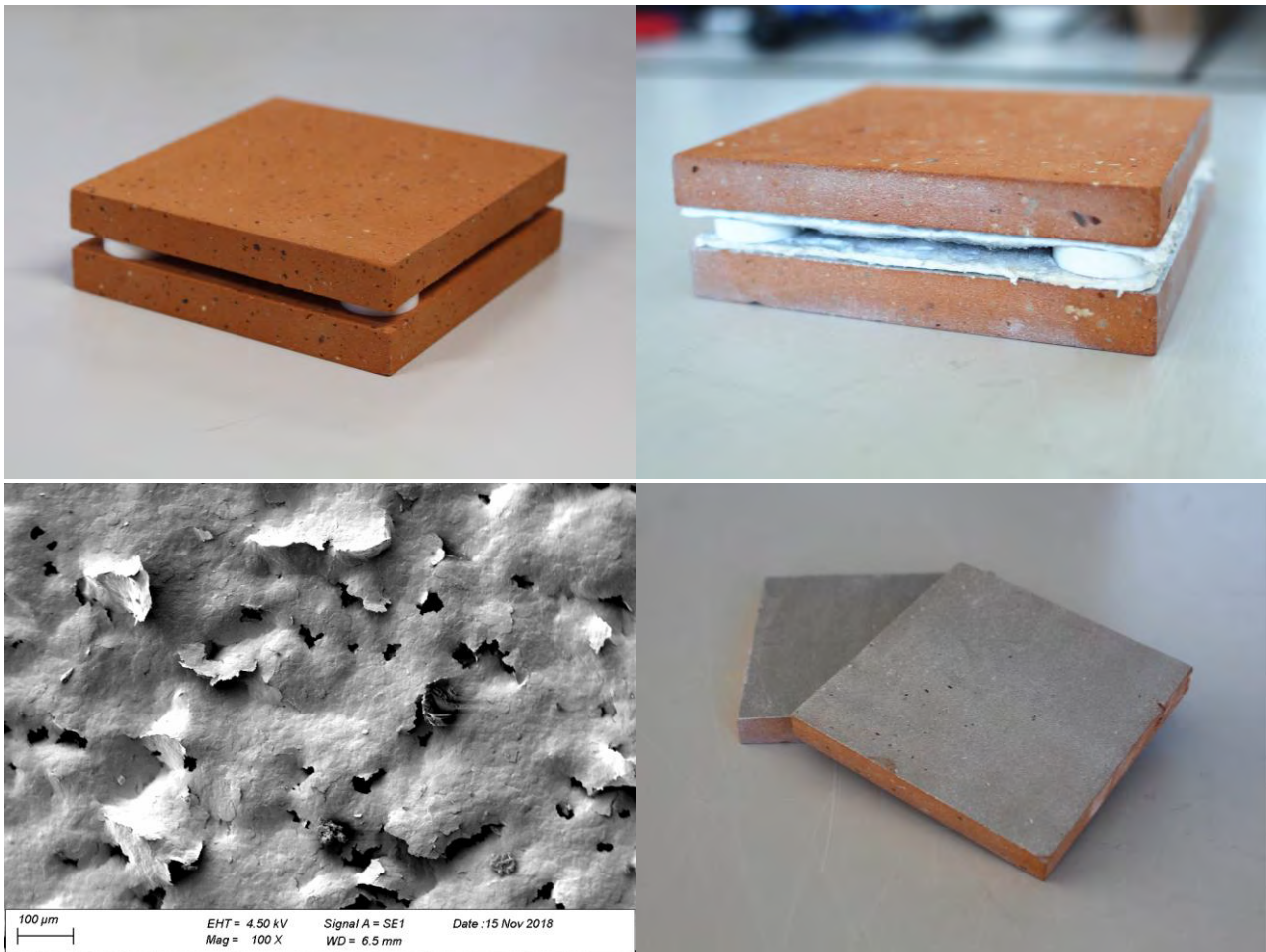


Abb. 1: Ziegelprobe mit Luftspalt (links oben); Ziegelprobe mit beschichteter Fasermatte mit Luftspalt (rechts oben); REM-Aufnahme einer mit einer Reflexionsschicht beschichteten Ziegelprobe (links unten); Beschichtete Ziegelprobe (rechts unten)

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der gemessenen Emissionskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeiten. Der Emissionskoeffizient wurde durch die Wärmedämmbeschichtung von $\varepsilon = 0,983$ der unbeschichteten Ziegeloberfläche auf $\varepsilon = 0,315$ deutlich abgesenkt. Die Wärmeleitfähigkeit minderte sich dabei von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,207 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,174 \text{ W/mK}$ ab. Die Ausrüstung des Zwischenraumes mit einem Polystyrol-Nanofaser-Vlies führte zu einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,163 \text{ W/mK}$. Der Emissionskoeffizient lag dabei deutlich höher als bei den beschichteten Proben, bei einem Wert von $0,942$. Die Beschichtung des Nanofaser-Vlies führte zu keiner weiteren Absenkung der Wärmeleitfähigkeit, wobei der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,983$ auf einen Wert von $\varepsilon = 0,731$ abgesenkt werden konnte. Die Fasern des Polystyrol-Nanofaser-Vlieses sind gekrümmt, zeigen keine einheitliche Oberfläche und sind von hoher Unregelmäßigkeit geprägt. Es kann angenommen werden, dass sich die Beschichtungspigmente deshalb nicht ebenmäßig ausrichten können und es deshalb zu keiner weiteren Absenkung der Wärmeleitfähigkeit kommt.

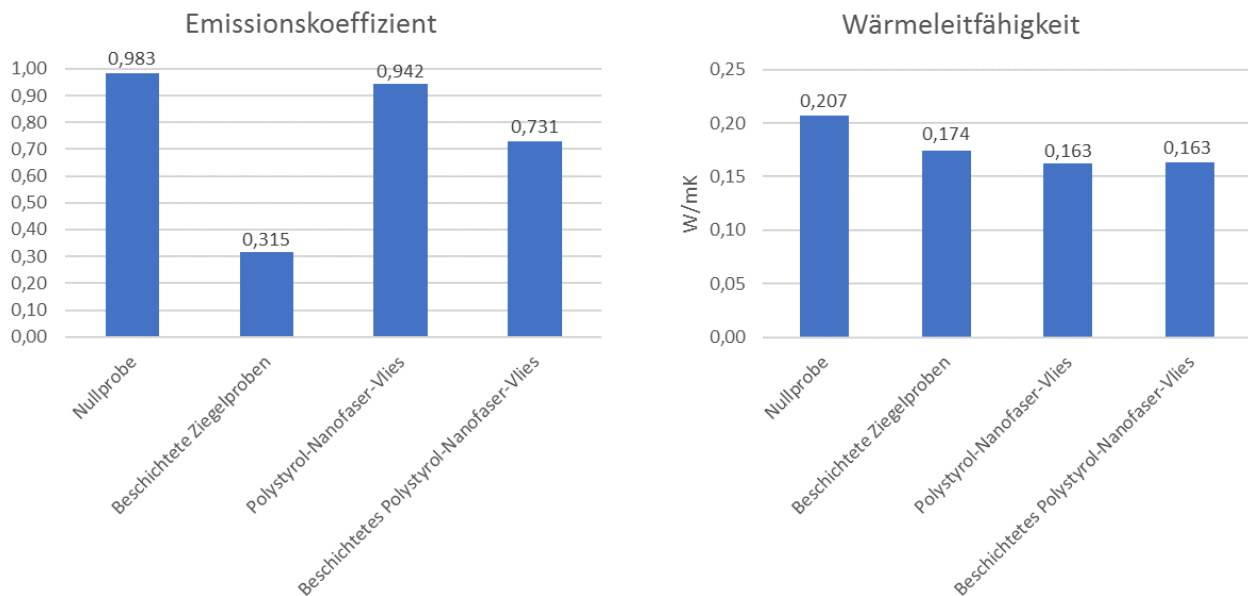


Abb. 2: Emissionskoeffizienten und äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von Ziegel-Nullproben, von Ziegelproben mit Beschichtung, von Ziegelproben mit Polystyrol-Nanofaser-Vlies und mit beschichtetem Polystyrol-Nanofaser-Vlies

Teil 2: Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele

Um die Wärmedämmung von Wandbaustoffen weiter zu verbessern, wurden Versuche mit Aerogelen und polymeren Nanofasern durchgeführt. Ziel ist die Erhöhung der mechanischen Stabilität der Silica-Aerogele bei möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit. Silica-Aerogele sind mesoporöse Materialien, die sich aus einem dreidimensional vernetzten Gerüst aus amorphen SiO_2 -Partikeln aufbauen (Abb. 3). Die „perlenkettenartige“ Mikrostruktur lässt sich dabei mit einem äußerst geringen Feststoffanteil synthetisieren, sodass die Rohdichten der Silica-Aerogele lediglich zwischen $\rho = 1$ bis 500 mg/cm^3 betragen. Die Kombination aus Nanoporosität und geringer Dichte des Dämmstoffs führt zu äußerst niedrigen Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda = 0,014$ bis $0,03 \text{ W/mK}$. Derart geringe Wärmeleitfähigkeiten werden bisher von keinem anderen Feststoff erreicht, wenn man von der Vakuumisulationspaneele (VIP) absieht.

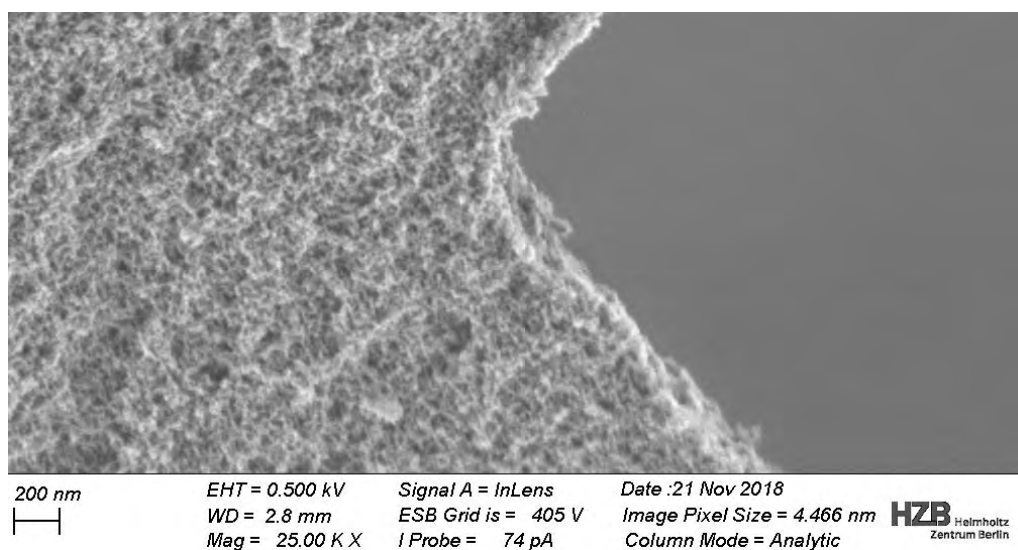


Abb. 3: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer synthetisierten Silica-Aerogel-Nullprobe. Die offenporöse Mikrostruktur aus dreidimensional vernetzten SiO_2 -Partikeln ist deutlich zu erkennen.

Bei Silica-Aerogelen handelt es sich daher um einen interessanten Werkstoff zur weiteren Verbesserung der Wärmeisolationseigenschaften von Bau- und Dämmstoffen, insbesondere dann, wenn ein hohes Maß an

Wärmedämmung auf begrenztem Raum gefordert ist (minimalinvasive Wärmedämmung). Trotz des herausragenden Wärmedämmvermögens, beschränkt sich der bisherige Einsatz von Silica-Aerogelen auf wenige Nischenanwendungen im High-Tech-Bereich. Neben der zeit- und kostenintensiven Herstellungsmethode, welche einen Sol-Gel-Prozess und eine sich anschließende superkritische Trocknung umfasst, lässt sich dies vor allem auf die geringe mechanische Stabilität von Aerogel-Monolithen zurückführen. Eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung des mechanischen Eigenschaftsprofils von Aerogelen besteht in deren Kombination mit polymeren Nanofasern z.B. auf Basis von recyceltem Styropor (aufgeschäumtes Polystyrol). Im Rahmen des Projektes werden daher Aerogel-Nanofaser-Komposite entwickelt. Das Ziel besteht darin, die Verbesserung der mechanischen Stabilität der Aerogele durch Nanofaser-Verstärkung bei möglichst vollständiger Erhaltung der Wärmedämmeigenschaften zu erreichen sowie die anschließende Erprobung der entwickelten Komposite als thermische Isolationsmaterialien. Hierzu wurden zunächst Silica-Aerogel-Nullproben aus einer im Vorjahr entwickelten Ausgangsrezeptur synthetisiert und charakterisiert (Abb. 4).

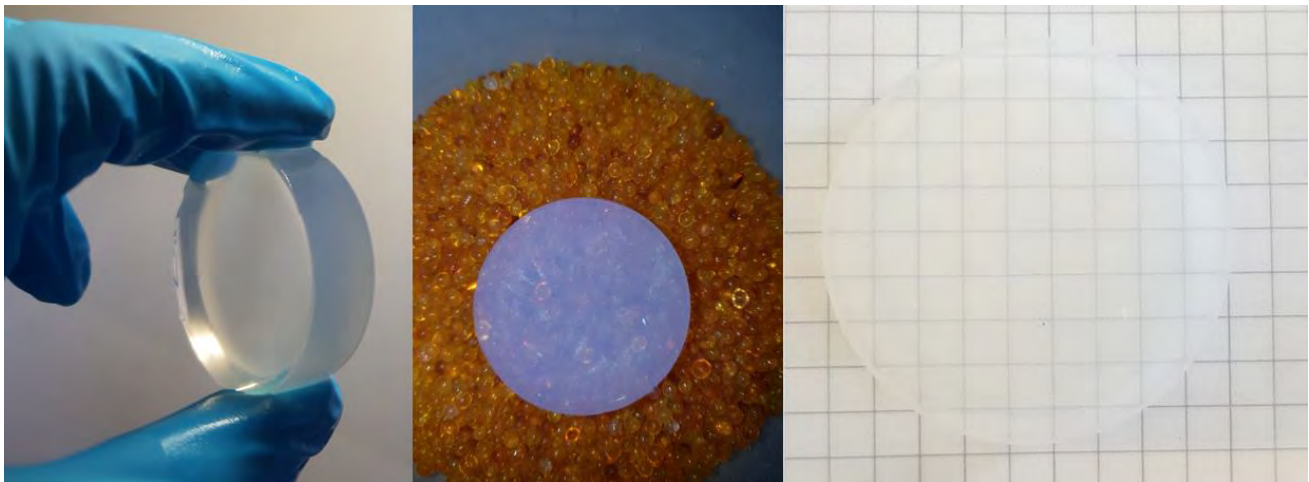


Abb. 4: Links: Ein kurz nach dem Sol-Gel-Prozess entformter Silica-Alkagel-Rohling. In diesem Zustand hat sich die Mikrostruktur bereits ausgebildet. Das Porenvolumen des Rohlings ist zu diesem Zeitpunkt noch mit Synthesefluid gefüllt. Mitte und Rechts: Überkritisch getrocknete Silica-Aerogel-Nullproben.

Diese verfügen bereits über die für Aerogele typischen Rohdichten und Wärmeleitfähigkeiten von $\rho = 175 \text{ mg/cm}^3$ und $\lambda = 0,025 \text{ W/mK}$. Eine ausreichende Hydrophobierung der Aerogele stellt eine weitere Voraussetzung für den Einsatz in der Gebäudehülle dar. Hier zeigten die Aerogel-Nullproben einen Optimierungsbedarf, da sowohl eine Massenzunahme bei Lagerung an Raumluft, als auch eine Kontaktwinkel-Messung auf eine unzureichende Hydrophobierung hinwiesen. Da die in der Literatur genannten Hydrophobierungsmethoden eine Schädigung der Polystyrol-Nanofasern hervorrufen, wurden alternative Ansätze zur Hydrophobierung erprobt.

Die besten Ergebnisse konnten dabei durch eine Kombination zweier unterschiedlicher Hydrophobier-Mechanismen erzielt werden. Der erste Mechanismus basiert auf dem Einsatz von Methyltriethoxysilan (MTES). Dabei handelt es sich um ein Precursor-Molekül, welches bereits während des Sol-Gel-Prozesses – also schon während der Bildung der Primärstruktur des Aerogels – hydrophobe Gruppen in das SiO_2 -Netzwerk integriert. Der zweite Mechanismus kommt nach Abschluss des Sol-Gel-Prozesses zum Einsatz. Dabei wird das synthetisierte Gel in einer Methoxytrimethylsilan-Lösung (MTMS) gewaschen, wodurch noch bestehende Hydroxylgruppen an der Geloberfläche durch hydrophobe Gruppen ersetzt werden. Die so hergestellten Nullproben zeichnen sich gegenüber den ursprünglichen Nullproben durch eine deutlich erhöhte Hydrophobie aus (Abb. 5).

Im weiteren Projektverlauf ist die Synthese und Charakterisierung von faserverstärkten Silica-Aerogelen vorgesehen. Hierzu wurden erste Vorversuche durchgeführt, die bereits vielversprechende Resultate zeigten. Dabei soll der optimale Fasergehalt ermittelt werden, bei welchem ein Maximum an mechanischer Festigkeit bei gleichzeitigem Erhalt der Wärmeisolation erreicht wird.



Abb. 5: Durch Anpassung der Synthese-Route konnten Silica-Aerogele mit ausgeprägter Hydrophobie hergestellt werden. Beim Aufbringen von Wassertropfen auf so hergestellte Nullproben stellt sich ein großer Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Aerogel-Oberfläche ein.

1.1.2 Entwicklung einer neuartigen Wärmedämmbeschichtung für Hochlochziegel; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Werkstofftechnik; Prof. Dr. Wolfgang Krcmar, M.Eng. Jan-Sebastian Hildebrand und Kevin Zeyer

In den Wandbau- und Dämmstoffen von Gebäudehüllen finden drei Arten der Wärmeübertragung statt, nämlich Leitung, Konvektion und Strahlung. Die Wärmeübertragung durch **Leitung** ist an feste Phasen gebunden, findet aber auch untergeordnet in ruhenden Fluiden statt und folgt dem Fourier'schen Gesetz (1). Die Wärmeübertragung durch **Konvektion** erfolgt in fluiden Phasen, z.B. in Gasen und Flüssigkeiten und folgt dem Newton'schen Gesetz (2). Beiden gemeinsam ist, dass der in der Zeiteinheit übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$ der Temperaturdifferenz ΔT proportional ist.

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{s} \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

$\dot{Q}$ = Wärmestrom
 λ = Wärmeleitfähigkeit
 A = Fläche
 s = Schichtstärke
 ΔT = Temperaturdifferenz
 α = Wärmeübergangszahl

Bei der Wärmeübertragung durch **Strahlung** ist das Vorhandensein einer festen oder fluiden Phase für die Wärmeübertragung nicht notwendig, sie kann auch im Vakuum erfolgen. Das dafür gültige Stefan-Boltzmann-Gesetz (3) unterscheidet sich stark von den beiden erstgenannten Formeln zur Berechnung der Wärmeübertragung. Es sagt aus, dass der durch Strahlung übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$ der 4. Potenz der Temperaturdifferenzen/100 proportional ist. Damit kommt diesem Gesetz auch bei vergleichsweise niedrigen Temperaturdifferenzen eine große Bedeutung zu.

$$\dot{Q} = C_{12} \cdot A \cdot [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad (3)$$

$\dot{Q}$ = Wärmestrom
 C_{12} = Strahlungsaustauschzahl
 A = Fläche
 $T_{1,2}$ = Temperaturen der Strahlflächen

Die wirksame Strahlungsaustauschzahl C_{12} wird, für sich im Strahlungsaustausch befindliche ebene Flächen, wie folgt berechnet (4):

$$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

C_{12} = Strahlungsaustauschzahl

C_s = Strahlzahl des schwarzen Körpers

ϵ_1 = Emissionskoeffizient der Fläche 1

ϵ_2 = Emissionskoeffizient der Fläche 2

Die Zahlenwerte der Emissionskoeffizienten ϵ der im Strahlungsaustausch befindlichen Flächen sind von besonderem Interesse. Diese liegen für alle Oberflächen zwischen den beiden Grenzwerten 0 und 1; im Falle der hier geprüften Ziegeloberflächen zwischen 0,94 bis 0,96. Damit resultiert für unbeschichtete Ziegeloberflächen ein größerer Wert für die Strahlungsaustauschzahl als bei beschichteten Oberflächen mit niedrigerem Emissionskoeffizient von beispielsweise 0,3. Da in die Stefan-Boltzmann-Gleichung die Strahlungsaustauschzahl als multiplikative Größe eingeht, gilt: Je niedriger der Emissionskoeffizient ϵ ist, umso niedriger ist die Strahlungsaustauschzahl C_{12} und umso niedriger ist der durch Strahlung übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$.

Durch Beschichtung der inneren Oberflächen von Hochlochziegeln mit einer ausgewählten Pigment-Mischung (Abb. 6) kann die Wärmeübertragung durch Strahlung massiv abgesenkt werden. Bereits sehr dünne Pigment-Schichten führen zu einer starken Reflexion im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung. Der Materialaufwand und damit die Kosten für die sehr dünnen Reflexionsschichten können geringgehalten werden, was ihre Attraktivität bei der Markteinführung so ausgerüsteter Produkte erhöht.

Inzwischen hat sich ein Konsortium aus 17 Mauerziegelwerken gebildet, die an der Markteinführung so beschichteter Ziegel interessiert sind. Die Ziegelwerke haben jeweils eine ausgewählte Ziegelsorte für Beschichtungsversuche im Energie Campus Nürnberg zur Verfügung gestellt (Abb. 7).



Abb. 6 Links: Die Beschichtung der Ziegeloberflächen mit einer besonderen Pigment-Mischung führt zur Absenkung des Emissionskoeffizienten um bis zu 80,8 %.

Abb. 7 Rechts: Hochwärmedämmende Mauerziegel die im inneren Lochmuster mit einer Wärmedämmbeschichtung ausgerüstet wurden. Es resultiert eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und damit einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um bis zu 27,54 %.

Für die Ziegelbeschichtungen steht im EnCN der Prototyp einer Beschichtungsanlage zur Verfügung. Für die Applikation wird die Pigment-Suspension durch ein Saugrohr aus einem Vorratsgefäß in das innere Lochprofil der Ziegel gesaugt. Auf diese Art wurden inzwischen Musterziegel von 17 interessierten Ziegelwerken beschichtet. Von 5 Ziegelsorten wurden bereits die Emissionskoeffizienten und die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der unbeschichteten und der beschichteten Ziegel ermittelt (Tab. 1). Während die nicht beschichteten Ziegeloberflächen Emissionskoeffizienten zwischen $\epsilon = 0,943$ bis $0,963$ aufweisen, führt die Beschichtung zu einer Reduzierung der Emissionskoeffizienten auf $\epsilon = 0,185$ bis $0,300$. Damit gelingt die Absenkung der Emissionskoeffizienten um bis zu 80,8 % und die Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äq}}$, je nach Lochbildgeometrie, um bis zu 27,54 % (Tab. 1). Es resultiert also eine Verbesserung der Wärmedämmung um 27,54 %.

Tabelle 1: Ergebnisse der Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit verschiedener Ziegelsorten durch Absenkung des Emissionskoeffizienten. Die genaue Lochbildgeometrie unterliegt der Geheimhaltung; 12 weitere Ziegelsorten werden z.Zt. noch gemessen.

Ziegel- sorte	$\epsilon_{\text{unbeschichtet}}$ [-]	$\epsilon_{\text{beschichtet}}$ [-]	$\lambda_{\text{äq, unbeschichtet}}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{\text{äq, beschichtet}}$ [W/(m·K)]	Verbesserung [%]
1	0,950	0,300	0,1120	0,1044	6,80
2	0,963	0,185	0,1175	0,0984	16,26
3	0,956	0,253	0,1121	0,0879	21,59
4	0,943	0,267	0,1934	0,1450	25,03
5	0,954	0,294	0,1271	0,0921	27,54

Der physikalische Effekt kann auf andere Wandbau- und Dämmstoffe mit Hohlkammer-Strukturen übertragen werden.

1.1.3 Ziegel 2020 – Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutz- Eigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid

Prototyping; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Werkstofftechnik, Prof. Dr. W. Krcmar, M.Eng. D. Sappa M.Eng., R. Karsdorf, M.Eng. F. Kugler und M. Eng. K. Oeder

Private und öffentliche Gebäude verbrauchen über 40 % der gesamten in Europa bereitgestellten Energie. Davon wird der größte Teil für die Beheizung verbraucht. Die Problematik des hohen Energieaufwandes für die Gebäudebeheizung und die dadurch entstehende Forderung nach verbesserter Wärmedämmung, hat seit Einführung der Energieeinsparverordnung zu einem großen Innovationsdruck in der Bauindustrie geführt. Auch die Ziegelindustrie war gezwungen neue hochwärmedämmende Produkte für den Hausbau zu entwickeln und dem Baustoffmarkt zur Verfügung zu stellen. Die Problematik bei hochwärmedämmenden Mauerziegeln besteht darin, dass die Optimierungsansätze zur weiteren Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit sich negativ auf andere wichtige Kenngrößen wie beispielsweise Druckfestigkeit und Schallschutzeigenschaften auswirken. Aus diesem Grund ist die Entwicklung neuer Mauerziegel mit angepassten Werkstoffeigenschaften notwendig, aber leider auch sehr zeit- und kostenintensiv.

Im hier vorgestellten Projekt (PTJ-FKZ 03ET1526A) besteht das Ziel darin, die bestehende Lochbildgeometrie ausgewählter Mauerziegel zu optimieren, so dass eine weitere Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit resultiert und sich dabei gleichzeitig die Schallschutzeigenschaften nicht verschlechtern. Darüber hinaus sollen auch neuartige Ziegelgeometrien entwickelt werden. Das Ziel wird u.a. durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode in Verbindung mit einem nachgeschalteten 3D-Druck der gewünschten „Ersatzziegel“ aus Polymilchsäure erreicht. Ausgestattet mit einer angepassten thermischen Leitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ der Polymilchsäure, besteht die Möglichkeit die neuartigen Kunststoff-Ersatzziegel im Wärmeprüfstand auf ihre äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu testen. Durch diese Vorgehensweise wird eine gewaltige Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes bei der Entwicklung neuer Ziegel-Generationen mit verbesserten Werkstoffeigenschaften ermöglicht. Der verwendete 3D-Drucker (Abb. 8 und 9) gehört mit einem Druckvolumen von einem Kubikmeter zu den größten Rapid Prototyping-Druckern im fränkischen Raum.



Abb. 8 Links: 3D-Drucker bigrep ONE der Firma bigrep. Das Druckvolumen beträgt 1 m³.



Abb. 9 Rechts: 3D-Druck eines Kunststoff-Ersatzziegels aus Polymilchsäure mit angepasster thermischer Leitfähigkeit.

Mit Bezug auf die Optimierung der Schallabsorption kann diese z.B. durch Erhöhung der Wandstärke an der wohnraumseitigen Stirnseite der Ziegel erreicht werden. Der nachfolgende Vergleich der akustischen Modalanalysen

(Abb. 10) zweier ähnlicher Ziegel-Lochbildgeometrien zeigt, dass sich die Schwingungsmoden und dadurch auch die Schallemission, durch die genutzten Optimierungen stark verringert.

Da sich Optimierungen der Ziegel-Lochbilder in Richtung verbesserter Schalldämmung üblicherweise negativ auf deren äquivalente Wärmeleitfähigkeit auswirken, wird im Folgeschritt die Wärmedämmung der Ziegel optimiert. Diese Prozesse werden iterativ durchgeführt, um letztlich zu Lochbildern zu gelangen, die einen bestmöglichen Kompromiss zwischen maximalem Schallschutz und maximaler Wärmedämmung aufweisen.

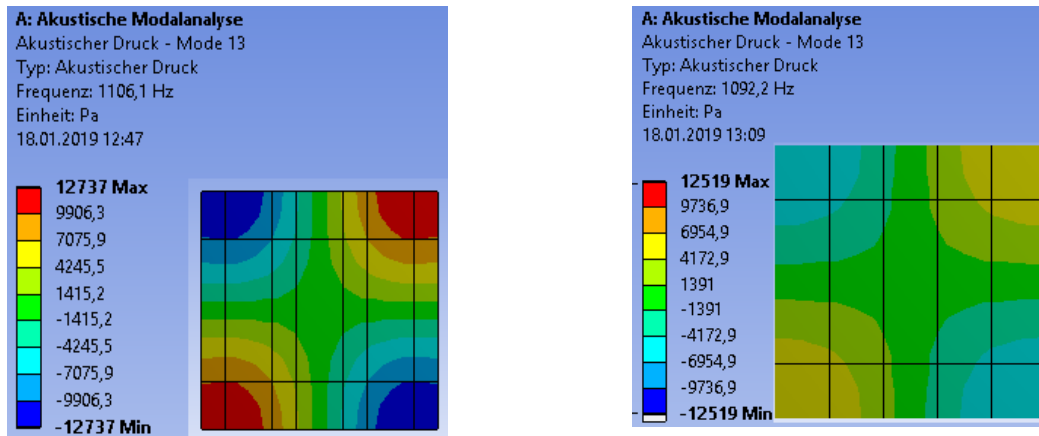


Abb. 10: Vergleich der akustischen Modalanalyse vor (links) und nach (rechts) der Schalloptimierung einer Ziegel-Lochbildgeometrie. Die tatsächlich berechnete Ziegel-Lochbildgeometrie unterliegt der Geheimhaltung.

Da sich Optimierungen der Ziegel-Lochbilder in Richtung verbesserter Schalldämmung üblicherweise negativ auf deren äquivalente Wärmeleitfähigkeit auswirken, wird im Folgeschritt die Wärmedämmung der Ziegel optimiert. Diese Prozesse werden iterativ durchgeführt, um letztlich zu Lochbildern zu gelangen, die einen bestmöglichen Kompromiss zwischen maximalem Schallschutz und maximaler Wärmedämmung aufweisen.

Personal und Investitionen

In der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ arbeiten derzeit 8 wissenschaftliche Mitarbeiter in 5 öffentlich geförderten Forschungsvorhaben. Außerdem sind fallweise ca. 20 Studenten als Hilfskräfte in Unterprojekten aktiv. Im Rahmen kooperierender Promotionen mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg haben im Berichtszeitraum eine Doktorandin und ein Doktorand Ihre Dissertationen erfolgreich eingereicht und sind inzwischen promoviert.

Die Arbeitsgruppe hat zusätzliche Drittmittel in bedeutender Höhe eingeworben. Deshalb konnte u.a. in ein IR-Spektrometer mit ATR-Einheit und einen Hochtemperaturofen bis 1700 °C mit Schutzgasatmosphäre investiert werden. Außerdem erfolgte die Inbetriebnahme eines neuen 3D-Druckers, mit dem Bauteile bis zu einem Druckvolumen von 1 m³ hergestellt werden können. Mit dem zugehörigen Compounder können Filamente aus z.B. Polymilchsäure mit angepasster thermischer Leitfähigkeit hergestellt werden. Außerdem wurde eine neuartige Test-Ofenanlage für keramische Baustoffe geplant und gebaut. Im Test-Ofen können z.B. Ziegel als thermische Speichermasse verwendet und zwischen 650 °C und 150 °C zyklisch im Wechsel aufgeheizt und wieder abgekühlt werden.

Kooperationen und neue Forschungsanträge

Kooperationen mit deutschen Hochschulen:

Bei der Durchführung von Dissertationen besteht eine langjährige erfolgreiche Kooperation mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „NanoFIM“ erfolgt eine Zusammenarbeit mit der Fakultät Physik der Freien Universität Berlin. Mit dem Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg besteht eine Zusammenarbeit im laufenden Forschungsvorhaben „Speicher A: Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direkt dampferzeuger“. Innerhalb der EFFIZIENZ-Arbeitsgruppe des EnCN erfolgt eine Zusammenarbeit mit dem

Fraunhofer Institut für Bauphysik, mit der Hochschule Ansbach sowie den Fakultäten „Werkstofftechnik“, „Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik“, „Maschinenbau/Versorgungstechnik“ und „Informatik“ der Technischen Hochschule Nürnberg. Ab Herbst 2019 besteht eine enge Zusammenarbeit mit der Fakultät „Angewandte Chemie“ der TH Nürnberg auf dem Gebiet der „Easy-to-Clean-Oberflächen“. Dabei sollen Baustoff- bzw. Werkstoff-Oberflächen mit dem photokatalytischen Selbstreinigungseffekt ausgerüstet werden.

Kooperationen mit europäischen Hochschulen, Institutionen und Industriebetrieben:

Im Rahmen des neu angelaufenen EU-Projekts „LightCoc“ (HORIZON 2020) besteht eine Forschungsk Kooperation mit 25 Partnern aus 9 EU-Ländern. Ziele sind die Forschung und Entwicklung neuer Leichtgewicht-Werkstoffe. Der Beitrag der Arbeitsgruppe besteht in der Neu- und Weiterentwicklung extrudierter hochwärmedämmender Mauerziegel mit innovativen Effekten sowie dem Aufbau einer Pilotanlage zur Herstellung von Laborziegeln im Technikum des EnCN. Das EU-Projekt ist mit 2 Doktorandenstellen ausgestattet und läuft über einen Zeitraum von 4 Jahren.

Darüber hinaus wurde ein weiteres EU-Projekt „Life HYPOBRICK: Towards hypocarbonic economy – Development of non-fired building materials based on wastes“ bewilligt. Hier erfolgt eine Kooperation mit weiteren 4 europäischen Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Die Aufgabe der Arbeitsgruppe besteht in der Entwicklung einer extrudierbaren Geopolymer-Mischung für neuartige Wandbaustoffe unter Einsatz von gemahlenem Bauschutt.

Kooperationen mit der Industrie:

Die Arbeitsgruppe ist sehr stark mit der heimischen Ziegelindustrie, insbesondere der bayerischen Mauerziegelindustrie vernetzt. Es besteht darüber hinaus auch eine Zusammenarbeit mit Ziegelwerken aus Tschechien, Österreich und der Schweiz. Die Arbeitsgruppe wirkt aktiv mit an der Forschungsplattform „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg mit immerhin 30 teilnehmenden Mauerziegelwerken. Im Innovationszirkel werden seit vielen Jahren im halbjährlichen Turnus neue Forschungsergebnisse präsentiert und künftiger Forschungsbedarf erhoben. Die Tagungen finden im EnCN statt. Darüber hinaus findet innerhalb der Forschungsvorhaben eine Zusammenarbeit mit Anlagenbauern von Ziegelwerken statt.

Ausblick

Das Ziel besteht im weiteren Ausbau der wissenschaftlichen Aktivitäten der Arbeitsgruppe. Neue nationale Forschungsanträge sind bereits in Arbeit. Dabei ist die direkte Beteiligung an Bauvorhaben geplant, um die im Labor erarbeiteten Erkenntnisse auch in der Baupraxis umsetzen zu können. An erster Stelle ist hier ein Muster-Bauprojekt mit hochwärmedämmenden, innenbeschichteten Hochlochziegeln zu nennen. Über eine Vorfertigung können die Baukosten erniedrigt werden. Darüber hinaus wird derzeit an einer Projektskizze für den 3D-Druck ganzer Häuser gearbeitet sowie an einer Projektskizze zur dynamischen Energiefreisetzung beim Tunnelofenbrand.

1.2 Teilautarke adaptive Technikfassade

1.2.1 Entwicklung eines Stromversorgungskonzepts für Fassaden mit integrierter

organischer gedruckter Photovoltaik; Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Günter Kießling und M.Sc. Kyriaki Koutrouveli

In 2018 wurden Prototypen des Stromversorgungskonzepts für ein aktives Fassadenelement aufgebaut. Da die Leistungsdichte der Erzeugung in der Fassade in Elemente bzw. Fensterachsen oder Zimmer und Etagen unterteilt wird, entstehen viele dezentrale Energieerzeuger sehr kleiner Leistung. Die Stromversorgungskonzepte beinhalten die Integration mehrerer solcher kleiner dezentraler elektrischer Energieerzeuger, die neue Wege erfordern. Hierzu wurden verschiedene Konfigurationen aus am Markt verfügbaren einsatzreifen Komponenten untersucht. Im Berichtszeitraum wurde die Elektrotechnik für die aktive Fassade eines Büroraumes beschafft, aufgebaut und mit ersten OPV-Kleinmodulen getestet. Dabei zeigte sich die im PV-Steller vorhandene Messtechnik als unzureichend, sodass zusätzlich die erforderliche Messtechnik aus Micro-Controller, Strom- und Spannungssensoren sowie Einplatinen-Computer ergänzt und in Betrieb genommen wurde. Die genau passenden OPV-Module für 6 m² Fläche in 6 Fenstern an der EnCN-Südfassade sind vom

Projektpartner ZAE für Februar 2019 angekündigt. Damit kann das Stromversorgungskonzept dann mit allen Komponenten praxisnah erprobt werden. Die Stelle des wiss. Mitarbeiters konnte ab Februar 2019 besetzt werden, somit ist die planmäßige weitere Bearbeitung des Arbeitspakets gesichert.

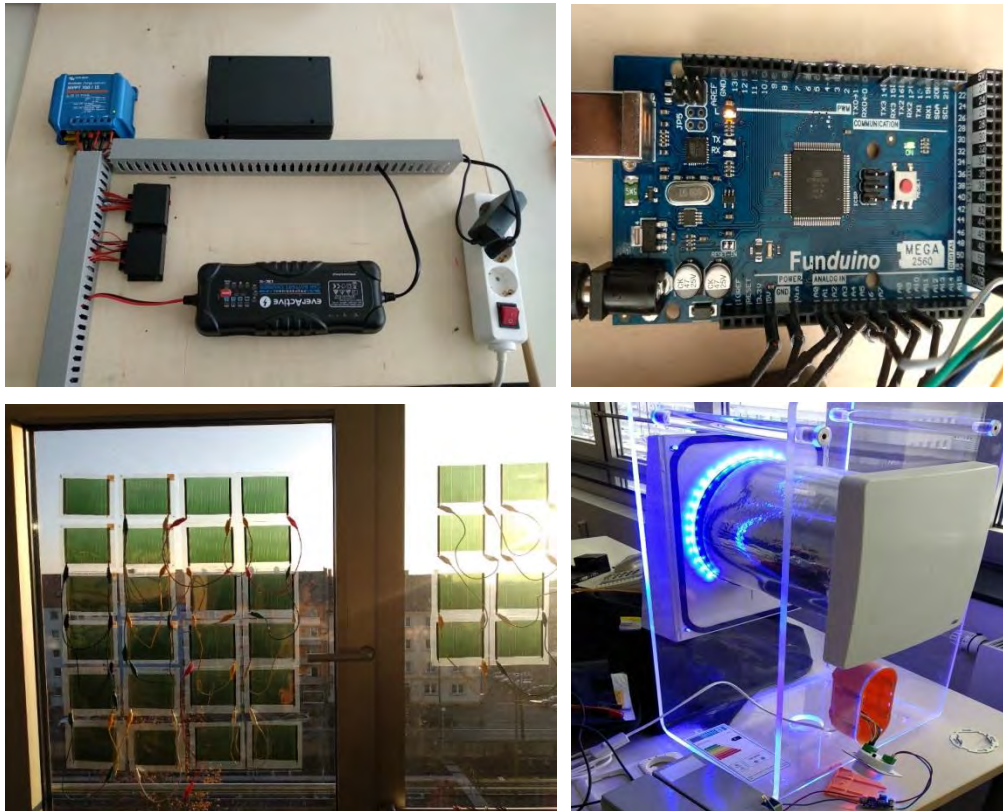


Abb. 11: Stromversorgungs-Prototyp der aktiven Fassade eines Raums mit PV/Batterie-Regler, Sensoren, Netzteil und Micro-Controller (oben) und OPV-Kleinmodule in Südfassade und Lüftung (unten). Elektrischer Speicher und LED-Beleuchtung sind nicht abgebildet.

1.2.2 Konstruktive Entwicklung und bauphysikalische Bewertung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden; Fraunhofer Institut für Baustoffprüfung (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 und dem Gebäude eine moderne und zukunftsorientierte Gestaltung zu geben. Häufig verhindern vermeintlich hohe Investitionskosten und Unsicherheiten im Planungsprozess (Brandschutz, Baurecht, Bauphysik, Statik) den Einsatz von PV-Fassaden, weshalb hier für die Technikfassade PV-Module als primäre energieadaptive Komponente für die Integration in eine passende Konstruktion gewählt werden.

Ziel ist es die PV-Elemente so in ein Fassadensystem zu integrieren, dass sie industriell gebrauchsfertig und hochpräzise produziert und schließlich an der Fassade eingehängt werden können. Hierfür eignen sich vor allem vorgehängte Fassadensysteme, welche häufig auf einem metallischen Grundgerüst basieren – z.B. Glas-Stahl- oder Glas-Aluminium-Fassaden, und meist als Pfosten-Riegel- oder Elementfassadenkonstruktion ausgeführt werden. Hierfür wurden im zweiten Berichtszeitraum basierend auf der zuvor erfolgten Auswahl der wesentlichen Materialien und Komponenten Konstruktionsdetails ausgearbeitet und prototypisch untersucht, um insbesondere die besonderen Anforderungen an den Brandschutz und die elektrische Sicherheit zu berücksichtigen.

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

Unter diesem Gesichtspunkt wurde eine Hängekonstruktion mit Lisenen entwickelt, dass die Kabelführung so erfolgen kann, dass die Steckverbindungen einfach während des Montageprozesses aus der Konstruktion herausgezogen werden können. Zudem wurde ein Kabelkanal verwendet, der im Brandfall zuschäumt und damit Rauch- und Brandausbreitung unterdrückt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf Kabeldurchführungen gelegt, die sowohl im Brandfall Schwachstellen darstellen, als auch bei der Montage gewährleisten müssen, dass die Kabelführung keinen Schaden, z.B. durch scharfe Kanten, nimmt. Durch die langen, vertikal hängenden Kabelführungen sind zudem ausreichend Zugentlastungen vorzusehen, die schon bei der Vorkonfektionierung fertig hergestellt sein müssen, um den Montageprozess nur auf das Stecken zu reduzieren.

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, M.Eng. Julian Buderus, M.Sc. Kutralingam Kandasamy und M.A. Marcel Neberich

Einführung und Motivation

Drei wichtige Säulen zur Umsetzung der Energiewende sind die Senkung des Energiebedarfs, die Steigerung der Effizienz sowie der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien. Um einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen, müssen diese drei Säulen auch in den Gebäudesektor integriert werden. Fassaden der Zukunft zeichnen sich durch eine hohe Dämmwirkung zur Minimierung der Wärmeverluste sowie durch die Integration von gebäudetechnischen Komponenten (bspw. fassadenintegrierten PV-Modulen) zur Steigerung der Effizienz aus und tragen dazu bei, die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung zu realisieren. Vor diesem Hintergrund wird im Forschungsbereich „Entwicklung von Bilanzierungsmethoden für fassadenintegrierte PV-Elemente und energieadaptive Fassaden durch Systemsimulation“ das Forschungsprojekt „Fassade³“ bearbeitet. Ziel ist die Konzeption eines Fassadenelementes in modularer Bauweise sowie die Entwicklung von Methoden zur Integration in die Gebäudetechnik.

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

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

Im ersten Projektjahr wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein Konzept für ein Fassadenelement in modularer Bauweise entwickelt (Abb. 13). Das hinterlüftete Fassadenelement besteht aus verschiedenen Komponenten, die in einen umlaufenden Elementrahmen integriert werden. Zur Aktivierung der Gebäudehülle werden organische Photovoltaikzellen (OPV) genutzt. Hierzu ist geplant, opake Teile des Fassadenelementes mit OPV-Modulen eines Projektpartners aus der Industrie zu bestücken. Zur weiteren Stromerzeugung sollen transparente OPV-Module in einem horizontalen Sonnenschutzsystem zum Einsatz kommen. Diese werden vom ZAE Bayern entwickelt und in der Solarfabrik der Zukunft am EnCN hergestellt. Für die Gebäudedämmung werden größtenteils nachwachsende Rohstoffe verwendet. Bei der Entwicklung des Dämmstoffs wird eine Wärmeleitfähigkeit in Höhe von 0,035 W/mK angestrebt, die im Bereich von konventionellen im Bauwesen eingesetzten Dämmmaterialien liegt, sowie die Brandschutzklasse B1.

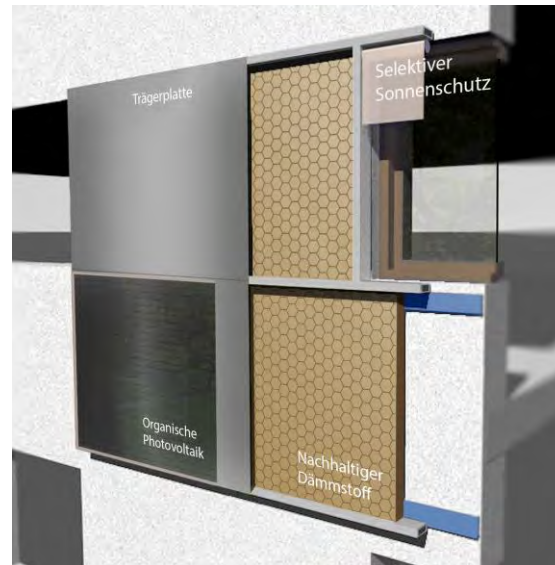


Abb. 13: Konzept eines aktiven Fassadenelementes (Fassade³)

Neben dem horizontalen, mit OPV-Modulen bestückten Sonnenschutz ist ein schaltbarer textiler Sonnenschutz im Fensterbereich vorgesehen. Die selektive Beschichtung des Behangs ermöglicht eine hohe Tageslichtnutzung bei niedrigen solaren Gewinnen, um eine Überhitzung der Räume im Sommer zu vermeiden. Zur Steuerung des textilen Sonnenschutzes und der Heizkörper, die sich in den an die Fassade grenzenden Räumen befinden, ist der Einsatz einer modellprädiktiven Regelung unter Berücksichtigung einer Wetterprognose geplant. Demonstrationsziel des Projekts ist die Elementfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude in Kitzingen zu installieren und mittels eines Intensivmonitorings wissenschaftlich zu begleiten.

1.3 „Interaktive Gebäudevisualisierung“; Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Informatik; Prof. Dr. Florian Gallwitz, M.Sc. Sergiu Deitsch und M.Sc. Michael Lechner

Das Ziel der Arbeiten in diesem Arbeitspaket besteht darin, 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 möglich wird. Die Gebäudehülle wird auf Basis der erfassten Aufnahmen in dreidimensionaler Form rekonstruiert, sodass diese über eine intuitive Benutzerschnittstelle von allen Seiten aus betrachtet und deren Oberflächentemperatur analysiert werden kann.

Im Februar 2018 konnte für dieses Arbeitspaket mit Michael Lechner ein Nachfolger für Sergiu Deitsch gewonnen werden. Herr Lechner verfügt bereits aus seiner Informatik-Masterarbeit über Erfahrungen mit SLAM-Algorithmen, die für die 3D-Gebäuderekonstruktion von zentraler Bedeutung sind. Er absolviert z.Zt. ein kooperatives Promotionsverfahren in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg (Prof. Andreas Maier). Der aus dem Projekt ausgeschiedene Sergiu Deitsch wird seine kooperative Promotion mit der FAU Erlangen (Prof. Joachim Hornegger) in Kürze abschließen.

Als besonderes Highlight erhielt Sergiu Deitsch für im Rahmen dieses Projekts von ihm geleistete Arbeiten im März 2018 einen Preis der Firma Google, den *Open Source Peer Bonus Award*. Der Preis wird von der Firma Google an externe Entwickler verliehen, die besonders wertvolle Beiträge zur Weiterentwicklung von Open-Source-Software geleistet haben.



Abb. 14: DJI Matrice M210 mit 4K-RGB-Kamera und hochwertiger IR-Kamera (640 x 480 Pixel, 30fps)

Während die in der vorangegangenen Projektphase genutzten Drohnenvideos noch mit einer Drohne des ZAE Bayern aufgenommen wurden, konnte im Sommer 2018 aus Mitteln der TH Nürnberg eine moderne, deutlich leistungsfähigere Drohne DJI Matrice M210 mit hochwertiger RGB- und Infrarotkamera beschafft werden, die ausschließlich für dieses Arbeitspaket zur Verfügung steht (Abb. 14). Mit dem Einsetzen der Heizperiode Ende 2018 konnten bereits eine Reihe von Flügen auf dem Hochschulgelände durchgeführt und Aufnahmen von Gebäuden gesammelt werden. Die so entstandenen parallelen Videoaufnahmen von Gebäuden im optischen und infraroten Spektralbereich sind in der wissenschaftlichen Welt bislang einzigartig und bilden eine wertvolle Grundlage für die weiteren Arbeiten.

Im Berichtszeitraum wurde außer an SLAM-Verfahren auch an der automatischen Analyse von Gebäudefassaden mittels Deep-Learning-Verfahren gearbeitet. Insbesondere die Erkennung der Fenster ist von großer Bedeutung, sowohl für die exakte 3D-Rekonstruktion als auch für die Bewertung der Oberflächentemperatur. Abb. 15 zeigt erste Ergebnisse eines automatischen Segmentierungsverfahrens für Gebäudefassaden am Beispiel eines Gebäudes der TH Nürnberg.



Abb. 15: Ein RGB-Bild eines Gebäudes der TH Nürnberg und die daraus entstandene automatische Segmentierung der Gebäudefassade mit Hilfe eines Deep-Learning-Verfahrens

1.4 Gemeinschaftsprojekt „Herzo Base Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Günter Kießling, Prof. Dr. Wolfgang Krcmar, M.Eng. Christina Betzold, M.Sc. Kyriaki Koutrouveli und M.Eng. Felix Kugler

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ (PTJ-FKZ_03ET1364A) erfolgt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aus drei Fakultäten der TH Nürnberg. In der 1. und 2. Projektphase wurde die Planung und der Bau von 8 hochgedämmten Reihenhäusern durchgeführt (Abb. 16). In der 3. Projektphase (Berichtszeitraum) fand ein Intensivmonitoring mit Betriebsoptimierung der Gebäudetechnik statt sowie die Erfassung und Bewertung von Sensordaten in den Wandaufbauten der Gebäudehüllen.



Abb. 16: Herzo Base - Energiespeicherhäuser: Ein Gebäudekomplex aus 8 hochgedämmten Reihenhäusern; von links nach rechts: Häuser 1 bis 8.

Gebäudehülle: Vergleichende Auswertung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Wandquerschnitten am Beispiel von Haus 4 mit Haus 5

Zur Bewertung der unterschiedlichen Baukonzepte der Gebäudehüllen, nämlich der einschaligen Standardbauweise (Häuser 5 bis 8) mit der zweischaligen Bauweise inklusive Wärmedämmfassade (Häuser 1 bis 4), wurden die Temperaturen, die relativen Luftfeuchtigkeiten, die absoluten Materialfeuchten und die Wärmeströme im Mauerwerks-Querschnitt in Abhängigkeit von der Zeit erfasst und ausgewertet. Abb. 15 zeigt die Sensoranordnung in den Wandquerschnitten.

Nachfolgend werden die Temperaturverläufe im Wandquerschnitt auf der Ostseite von Standard-Haus H 5 (Perlitgefüllte Ziegel der Wandstärke 36,5 cm mit $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,07 \text{ W/mK}$) über einen Zeitraum von 24 Std. (26.05.2018, 00:00 bis 27.05.2018, 00:00 Uhr) mit den entsprechenden Temperaturverläufen im Wandquerschnitt auf der Ostseite von Haus H 4 (Perlitgefüllte Ziegel der Wandstärke 30,0 cm mit $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,08 \text{ W/mK}$ und zusätzlicher, außen vorgesetzter Wärmedämmfassade aus CALOSTAT-gefüllten Vorsatzziegeln der Steinbreite 12 cm) verglichen (Abb. 18).

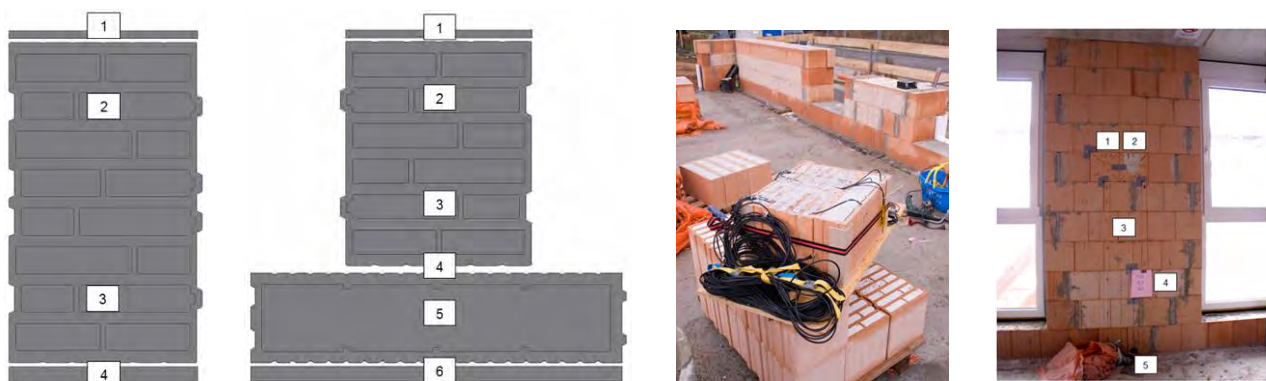


Abb. 17: Sensorplatzierungen im Wandquerschnitt. Links: Einschalige Bauweise, 1=Innenputz, 2=2. Perlit-Reihe von Innen, 3=2. Perlit-Reihe von Außen, 4=Außenputz (Häuser 5 bis 8). Mitte-Links: Zweischalige Bauweise, 1=Innenputz, 2=2. Perlit-Reihe von Innen, 3=2. Perlit-Reihe von Außen, 4=äußere Ziegeloberfläche, 5=Calostat-Füllung, 6=Außenputz (Häuser 1 bis 4). Mitte-Rechts: Messziegel mit eingebauten Sensoren. Rechts: In die Wand eingebaute Messziegel, 1=Messziegel für Materialfeuchte, 2= Standard-Messziegel für Temperaturen, Wärmestrom und relat. Luftfeuchtigkeit, 3=Sensor kabel innerhalb der Wand verlegt, 4=Raspberry Pi, 5=Kabelaussgang in Estrich-Verrohrung.

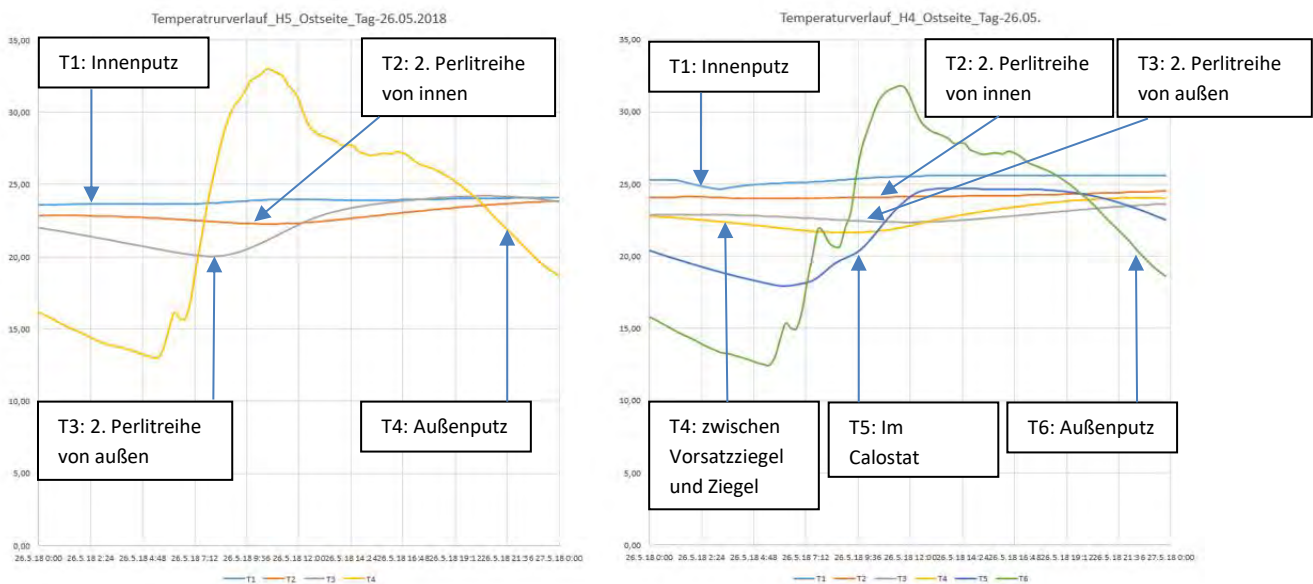


Abb. 18: Vergleich der Temperaturverläufe in der Gebäudehülle von Standard-Haus H 5 (links) und der zweischaligen Bauweise mit CALOSTAT-gefüllter Wärmedämmfassade von Haus H 4 (rechts). Die Sensoren sind von Innen nach Außen angeordnet; T1 im Innenputz, T2 in zweiter Perlitreihe von Innen, T3 in der zweiten Perlitreihe von Außen und T4 im Außenputz von Gebäude H 5 bzw. der Außenseite des Hochlochziegels H 4. Der Sensor T5 ist in der Calostat-Dämmung; der Sensor T6 ist im Außenputz von Gebäude H 4 platziert.

Die Temperatur-Sensoren T1 bis T4 sind im Wandquerschnitt von Haus H 5 im Innenputz T1, in der zweiten Perlitreihe von innen T2, in der zweiten Perlitreihe von außen T3 und im Außenputz T4 verbaut. Für den zweischaligen Aufbau in Haus H 4 wurden zwei weitere Sensoren in die Vorsatzziegel der Wärmedämmfassade eingebracht. Der Sensor T5 ist in der Calostat-Dämmung des Vorsatzziegels und der Sensor T6 ist im Außenputz von Gebäude H 4 platziert. Im Fall von Haus 4 ist der Sensor T4 auf der äußeren Oberfläche des perlitgefüllten Mauerziegels platziert.

Aus der Betrachtung der Temperaturverläufe (Abb. 18) ist ersichtlich, dass diese von außen nach innen immer konstanter werden. Alle zeitlichen Temperaturverläufe werden von außen nach innen zunehmend gedämpft und zeitlich verschoben und erreichen im Innenputz T1 eine praktisch konstante Temperatur.

Vergleich des zeitlichen Temperaturverlaufs am T4-Sensor in Haus H 5 mit dem T6-Sensor in Calostat-Haus H 4:

Beide Sensoren befinden sich im jeweiligen Außenputz beider Gebäudehüllen. Erwartungsgemäß verhalten sich die zeitlichen Temperaturverläufe in beiden Außenputzen nahezu gleich. Für Haus H 4 (T6) fällt lediglich ein zusätzlicher Peak während der Aufheizphase am Vormittag auf, der möglicherweise auf den Schattenwurf eines Objekts zurückgeführt werden kann.

Vergleich des zeitlichen Temperaturverlaufs am T3-Sensor in der 2. Perlit-Reihe des Ziegels von außen in Haus H 5 mit dem T3-Sensor an gleicher Stelle von Calostat-Haus H 4:

Beiden Gebäudehüllen ist gemeinsam, dass im Außenputz jeweils die niedrigste Temperatur von 13 °C gemessen wurde. Für den T3-Sensor in Haus 5 fällt auf, dass die niedrigste Temperatur von 13 °C die im Außenputz gemessen wurde, deutlich abgeschwächt und lediglich ein Minimum von 20 °C erreicht wird. Zusätzlich wird dieses Minimum erst zwei Stunden und dreißig Minuten später erreicht als im Außenputz. Bei Betrachtung des T3-Sensors in Haus 4 wird die Temperaturschwankung durch die zweischalige Bauweise wesentlich stärker reduziert, so dass lediglich eine Temperaturveränderung um 1°C auftritt. Zusätzlich ist eine zeitliche Verschiebung des Minimums um siebeneinhalb Stunden zu vermerken.

Vergleich des zeitlichen Temperaturverlaufs am T2-Sensor in der 2. Perlitreihe des Ziegels von innen in Haus H 5 mit dem T2-Sensor an gleicher Stelle von Calostat-Haus H 4:

Während für Haus H 5 in einschaliger Bauweise noch eine leichte zeitliche Temperaturschwankung zwischen 22 °C und 23 °C zwischen Tag und Nacht feststellbar ist, detektiert der entsprechende T2-Sensor im Perlit-gefüllten Ziegel von Haus H 4 (zweischalige Bauweise) praktisch keine zeitlichen Temperaturschwankungen.

Vergleich des zeitlichen Temperaturverlaufs am T1-Sensor im Innenputz von Haus H 5 mit dem T1-Sensor an gleicher Stelle von Calostat-Haus H 4:

Die Temperaturverläufe der T1-Sensoren im Innenputz beider Gebäudehüllen verlaufen praktisch konstant. Diese Temperaturen werden direkt durch das Nutzerverhalten der Bewohner, beispielsweise durch das Verschatten der Fenster oder die verbauten Heiz- und Kühlmöglichkeiten, beeinflusst. So ist erkennbar, dass die Bewohner von Haus 4 eine höhere Innenwand- und Raumtemperatur bevorzugen als die Bewohner von Haus H 5. Da die T1-Temperaturen beider Häuser über den ganzen Tag nahezu konstant verlaufen, ist davon auszugehen, dass hier nahezu keine Temperatureinwirkungen von außen vorhanden sind und die Häuser beider Bauweisen jeweils optimal gedämmt sind.

Fazit:

Beide Gebäudehüllen sind optimal gedämmt. Jedoch ist festzustellen, dass im Falle der zweischaligen Bauweise (Haus H 4) die Dämmwirkung bereits durch die Calostat-gefüllte Ziegelvorsatzschale erreicht wird, während bei der einschaligen Gebäudehülle (Haus H 5) die gleiche Dämmwirkung erst in der 2. Perlitschicht von innen zum Tragen kommt. Daraus geht hervor, dass eine Calostat-gedämmte Wand bei gleicher Dämmwirkung wesentlich schmäler ausgelegt werden kann.

Analog zur hier gezeigten vergleichenden Auswertung der zeitlichen Temperaturverläufe in den Gebäudehüllen der Häuser H 5 und H 4, werden die entsprechenden Messungen für alle 8 Forschungshäuser im Rahmen eines einjährigen Kurzzeit-Monitorings durchgeführt. Darüber hinaus erfolgt zusätzlich die Auswertung der rel. Luftfeuchtigkeiten sowie der Wärmeströme in den unterschiedlichen Gebäudehüllen. Die Auswertungen werden nicht nur für die Ostseite, sondern auch für die Westseite der Häuser erstellt und zusätzlich für die Nord- und Südseite der beiden Eckhäuser. In einem Folgeprojekt „HerzoOpt“ werden diese Auswertungen noch über weitere drei Jahre (Langzeit-Monitoring) vollzogen.

Gebäudetechnik: Entwicklung einer modellprädiktiven Steuerung für modulierende Wärmepumpen

Der wesentliche Schwerpunkt der Gebäudetechnik liegt auf der Entwicklung von Betriebsführungsstrategien zur optimierten Steuerung von zwei modulierenden Wärmepumpen (MWP), um den Eigenverbrauch der Photovoltaikerzeugung (PV) zu erhöhen. Der Vorteil der MWP ergibt sich aus ihrer Flexibilität, welche es ermöglicht, die aktuelle Wärmeerzeugung an die verfügbare PV-Leistung anzupassen. Die Schaltung weiterer aktiver Komponenten, z. B. der Warmwasser-Booster und der Batterie, wird ebenfalls in den Betriebsführungsstrategien berücksichtigt. Die Entwicklung der modellprädiktiven Betriebsführung erfolgte mit der Software MATLAB. Hierin sind der thermische und elektrische Energieverbrauch der acht Reihenhäuser sowie die gesamte Anlagentechnik abgebildet. Das Ziel der modellprädiktiven Betriebsführungsstrategie (MPC) ist es, die Kosten für den Verbrauch von Netz-, PV- und Batteriestrom zu minimieren. Unter Berücksichtigung einer Wetterprognose erstellt die MPC einen Betriebsplan für die Wärmepumpen und die Batterie, um die thermischen und elektrischen Speicher gezielt zu be- oder entladen.

Die MPC wurde mit einer Standardregelung für Wärmepumpen verglichen. Die Standardregelung umfasst eine wärmegeführte Regelung der Wärmepumpen (HC) zur Beladung der thermischen Speicher. Zudem sind die Wärmepumpen nicht stufenlos schaltbar. Wird der Betrieb der Wärmepumpen in beiden Varianten verglichen, so zeigt sich, dass die Wärmepumpen im MPC-Betrieb häufiger und in Modulation einschalten und den thermischen Speicher nur für den notwendigen thermischen Energiebedarf beladen (Abb. 19). Der Verlauf des elektrischen Verbrauchs zeigt bei MPC-Betrieb geringere Lastspitzen.

Zusammengefasst zeigt die MPC eine höhere Flexibilität zur Nutzung der thermischen und elektrischen Speicher (Abb. 20). So wurde die Batterie häufiger be- und entladen (8 % bzw. 13 %). Außerdem wurde auch die Direktnutzung von PV um 10 % und die Netzeinspeisung um 4 % reduziert. Der Netzbezug wurde um 43 % reduziert. Für den dargestellten Fall konnte eine Kostenersparnis von 12 % erzielt werden.

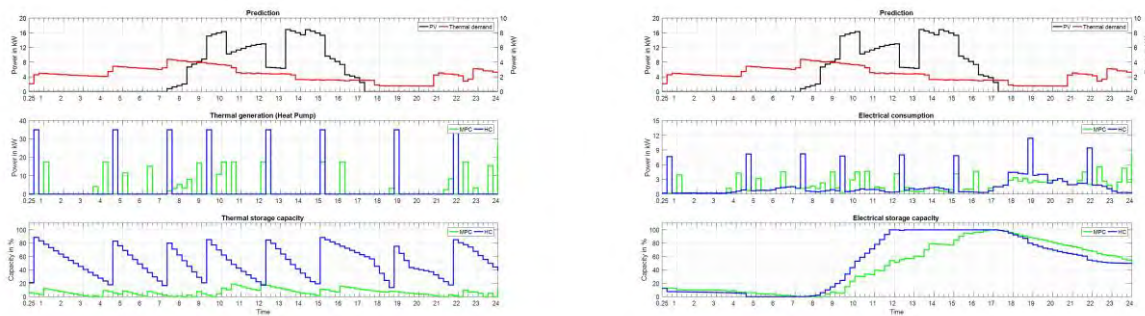


Abb. 19: Thermischer Betrieb der Wärmepumpen und der Batterie bei MPC-Betrieb (links) und bei HC-Betrieb (rechts)

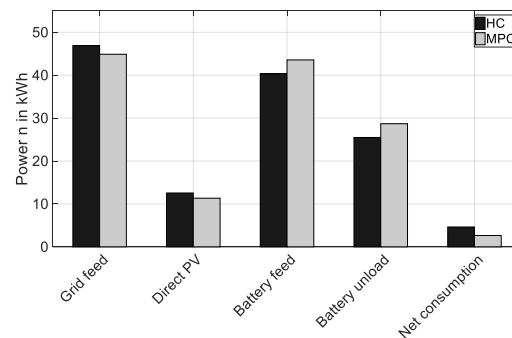


Abb. 20: Vergleich der Energienutzung bei MPC- und HC-Betrieb

Entwicklung einer optimierten Ladestrategie des Batteriespeichersystems für das Management der Drosselung der PV-Anlage

Die PV-Dachanlage mit einer installierten Leistung von 87,6 kW hat ein Erzeugungspotential von über 60 kW. Während der Sommermonate sind hohe Einspeisungsspitzen nicht zu vermeiden. Um die Anforderungen des kW-Förderprogramms zu erfüllen, ist eine Drosselung der PV-Leistung auf 60 % notwendig, damit die Einspeiseleistung diese Grenze nicht übersteigt. Um die wirtschaftlichen Verluste durch eine Drosselung zu vermeiden, kann der zentrale Batteriespeicher als zusätzliche Last genutzt werden. Ein nicht optimiertes, quasi "egoistisches" Laden führt bereits vormittags zu einer vollen Batterie. Hierfür wurde neben der optimierten Betriebsführungsstrategie des Batteriesystems eine zusätzliche Ladestrategie für die Sommermonate entwickelt. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Leistung der PV-Anlage durch eine effiziente Minimierung der Einspeiseleistungsspitzen zu drosseln. Das dazugehörige Konzept wird in Abb. 19 dargestellt:

Nach Sonnenaufgang und vor einem vorgegebenen Start-Zeitpunkt (T_{start}) wird der Ladevorgang der Batterie gesperrt und die Ladeleistung auf 0 kW gesetzt, sodass die Batterie schon morgens nicht vollgeladen wird. Im Zeitraum $T_{\text{start}} < t < T_{\text{end}}$ lädt der Wechselrichter die Batterie mit einer vordefinierten Ladeleistung $P_{\text{opt}} < P_{\text{max}}$ (Abb. 22 links). Dadurch wird während der Mittagszeit eine zusätzliche elektrische Last der Gebäudelast hinzugefügt und die Einspeiseleistung somit reduziert. Die Ladeleistung P_{opt} ist so niedrig, dass ein schnelles Aufladen der Batterie verhindert wird. Der Start- und End-Zeitpunkt sowie die Ladeleistung der Batterie wurden durch simulationsbasierte Optimierungsprozesse, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Batteriewechselrichters und der Einspeiseleistungsgrenze festgestellt. Während des Ladevorgangs der Batterie wird die Einspeiseleistung am Netzanschlusspunkt dauerhaft gemessen. Wenn diese Leistung zu hoch ansteigt und eine Spitze unvermeidbar wird, wird die Ladeleistung entsprechend angepasst (Abb. 22 rechts). Die entwickelte Ladestrategie führt zu einer Gewinnsteigerung durch die Einspeisevergütung, trotz möglicher Energieverluste an Tagen mit schlechtem Wetter.

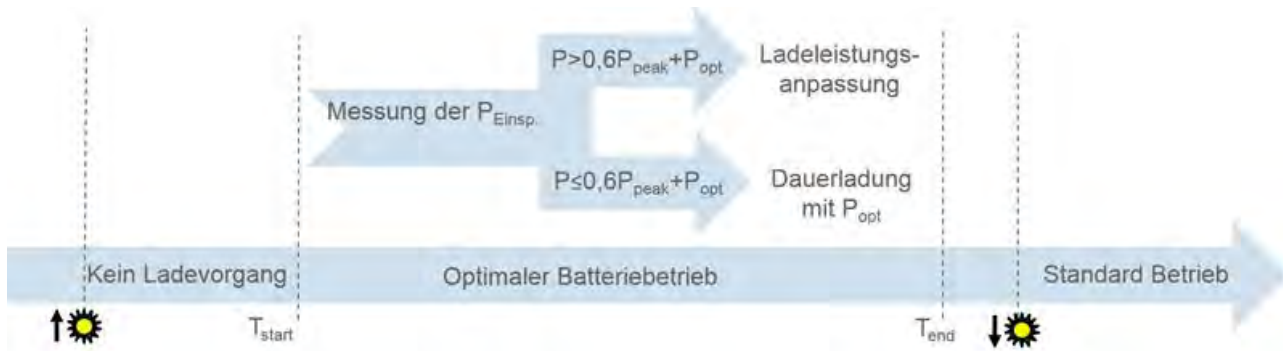


Abb. 21: Optimierter Ladevorgang des Batteriespeichersystems für die Vermeidung einer Drosselung der PV-Leistung.

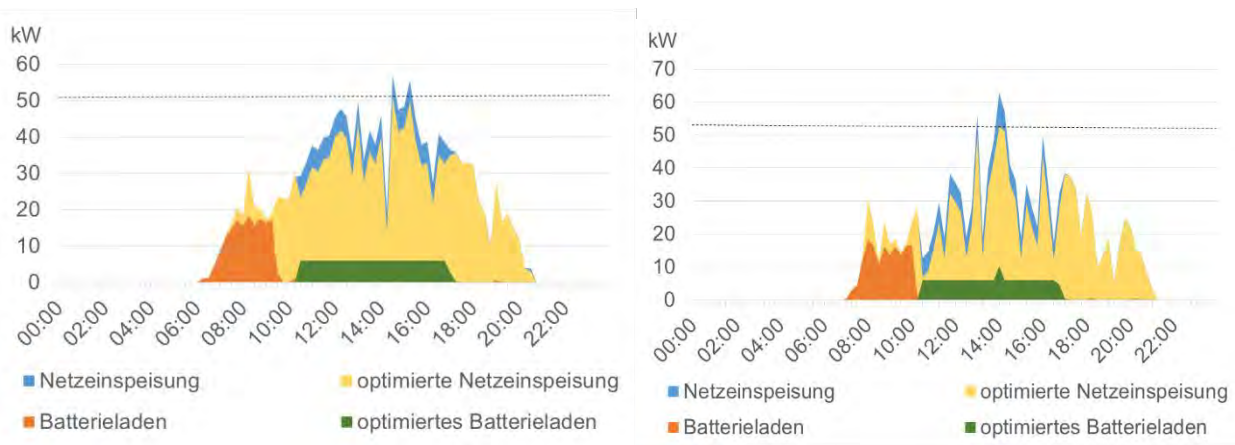


Abb. 22: Netzeinspeisung ohne (blau) und mit optimierter Batterie (gelb), rechts ein Beispiel mit Ladeleistungsanpassung).

Entwicklung und Umsetzung des Spitzenlast-Managementkonzepts

Die Lastspitzen-Management-Strategie (d.h. die Kappung von Netzbezugsleistungsspitzen am Netzanschlusspunkt) wurde so entwickelt, dass die Netzbezugskosten minimiert werden. Sie besteht aus der Kombination der Leistungsbeeinflussung von abschaltbaren, elektrischen Verbrauchern und der Nutzung der Reservekapazität der Batterie. Diese Verbraucher sind die Heizungs- und die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen sowie elektrische Autos. Das Lastspitzenmanagement wird aktiviert, wenn eine drohende 15-minütige Leistungsspitze am Netzanschlusspunkt erkannt wird. Die elektrischen Verbraucher und der Batteriewechselrichter werden dabei durch die Gebäudeautomatisierung ferngesteuert. Die Reservekapazität der Batterie wird nur dann genutzt, wenn das Abschalten der Verbraucher unerlaubt erfolgt oder eine Spitze unzureichend minimiert wird.

Abb. 23 zeigt den Einfluss des Spitzenlast-Managements auf den Netzbezug des Gebäudes an zwei verschiedenen Wintertagen. In der Abb. 23 (links) ist die Umsetzung des Konzeptes, welches hier durch das Abschalten von Heizlasten erfolgt, veranschaulicht. Die oberste Grenze der Netzbezugsleistung P_x wurde auf 14 kW gesetzt. Das Abschalten führt zu einer zeitlichen Verschiebung der Heizlast des Gebäudes, allerdings zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die gesamte Last des Gebäudes schon gesenkt wurde. Die Konzeptumsetzung, welche durch die Nutzung des Batteriespeichersystems erfolgt, wird in Abb. 23 (rechts) demonstriert. Die Batterie wird mit einer entsprechenden Entladeleistung entladen, um die Spitze zu kompensieren.

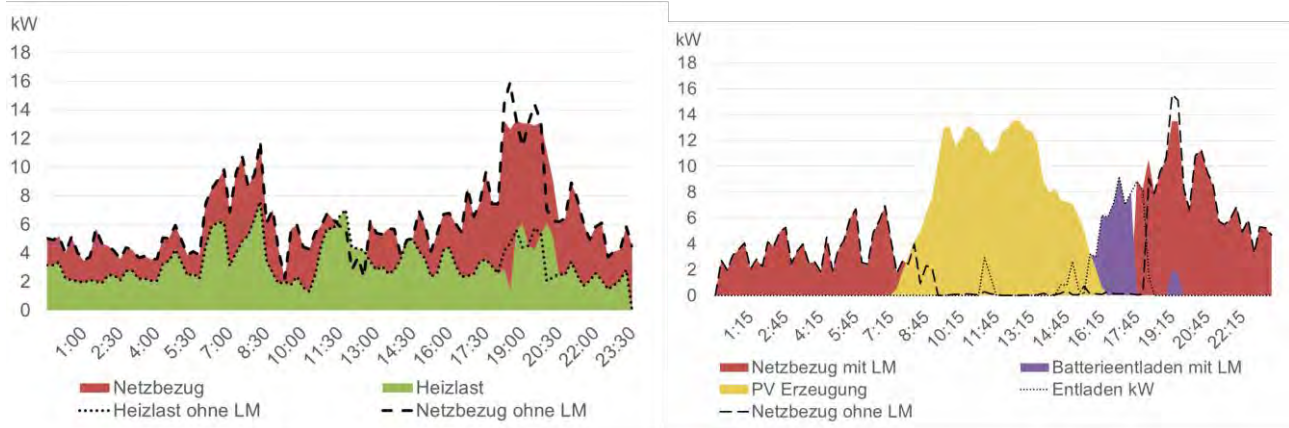


Abb. 23: Netzbezug und Heizlast an zwei Wintertagen mit und ohne Umsetzung des Spitzenlast-Managements; durch das Abschalten von Heizlasten (links) und durch die Nutzung der Reservekapazität der Batterie (rechts)

TPJ 2: Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasen- maschinen; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Andreas Kremser, M.Sc. Richard Steckel, M.Sc. Martin Regnet, M.Sc. Dennis Jagozs, M.Sc. Lukas Rabenstein, M.Sc. Kritika Deepak

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 wurden 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 in der Industrie verbauten elektrischen Antriebe 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 den 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 so erreicht werden. Als Ergebnis dieses EnCN-Forschungsprojektes stehen allgemeingültige Berechnungsansätze für mehrsträngige Induktionsmaschinen sowie geeignete Ansteuerkonzepte und -verfahren von Standardindustriemrichtern zur Verfügung, mit denen mehrphasige Induktionsantriebe methodisch ausgelegt und optimiert werden können.

Arbeiten und Ergebnisse

Grundsätzlich werden Mehrphasenmaschinen mit einer Strangzahl von $m = k \cdot a$ untersucht. Dabei wird die Wicklung der rotierenden elektrischen Maschine aus k Wicklungssystemen mit je a Subphasen aufgebaut. Die Anzahl der Subphasen ist ungerade und weist zur Entlastung des Sternpunktes eine Phasenverschiebung von $\varphi = 2\pi/a$ auf. Die Sternpunktentlastung bei Mehrphasensystemen mit gerader Strangzahl und einem Vielfachen von a werden durch eine

Phasendrehung von $\varphi_m = \pi/m$ der k Wicklungssysteme zueinander realisiert. Da der Betrieb der Maschine mit Standardumrichtern ausgeführt werden soll, ergeben sich ausschließlich Strangzahlen von $m = k \cdot 3$.

Als Ergebnis des ersten Förderjahrs steht eine Berechnungsplattform für mehrphasige Industrieantriebe zur Verfügung. Damit kann der magnetische Kreis der Maschine auf Basis nichtlinearer Reluktanznetzwerke berechnet werden. Dieses Verfahren bietet eine Nachrechnung des magnetischen Kreises mit ausreichender Genauigkeit und ermöglicht in der Auslegungsphase Parametervariationen mit deutlich geringerer Rechenzeit zu lösen. Dieses Verfahren erlaubt die Nachrechnung des Grundwellenverhaltens im stationären Betrieb.

Zur Berechnung der Oberfelderscheinungen in Mehrphasenmaschinen erfolgte eine analytische Modellbeschreibung der gekoppelten Kreise mit Hilfe eines Spannungsdifferentialgleichungssystems. Die Berechnung der Widerstandsmatrizen erfolgte mit den konventionellen Ansätzen aus der Literatur. Die Elemente der Induktivitätsmatrizen, Selbst- und Gegeninduktivitäten, wurden mittels einer Fourier Reihenentwicklung der Luftspaltfelder beschrieben. Damit kann die Kopplung der Wicklungssysteme über die Oberwellenstreuung für verschiedene Maschinenkonfigurationen untersucht werden. Die Kopplung über die Nutstreuung und die Stirnkopfstreuung wurden mittels analytischer Ansätze berechnet und nachfolgend in das Induktivitätsmodell der gekoppelten Kreise integriert. Das Modell ermöglicht die Berechnung des Maschinenverhaltens bei Umrichterspeisung mit erheblich geringerem Rechenaufwand im Vergleich zu numerischen Verfahren mittels Finiter Elemente und dient als Grundlage für weitere Untersuchungen verschiedener Reglungs- und Steuerkonzepte.

Ein Prototyp der Baugröße 160 ist mit einer Strangzahl von $m = 2 \cdot 3$ ausgelegt und gefertigt. Somit stehen zwei baugleiche Maschinenkonfiguration VM316 (konventionelle Asynchronmaschine mit $m = 3$) und VM631 (mehrphasige Asynchronmaschine mit $m = 2 \cdot 3$) zur messtechnischen Verifikation der entwickelten Berechnungsmodelle am Motorprüfstand des EnCN zur Verfügung (Abb. 24). Zur ersten Verifikation mit sinusförmiger Spannungsspeisung wird ein Trenntransformator mit zwei sekundären Wicklungssystemen mit einer Schaltgruppe Dy5d0 verwendet. Die Sekundärwicklungen sind für gleiche Klemmenspannung ausgelegt und werden jeweils im Stern und Dreieck verschalten, um die Phasenverschiebung von $\varphi_m = \pi/6$ zwischen der dreiphasigen Wicklung zu realisieren. Der sechsphasige Trenntransformator ermöglicht die Messung der mehrphasigen Drehstrommaschine mit sinusförmiger Spannungsversorgung und Messungen zur Bestimmung der Effizienz nach Norm IEC60034-2 können durchgeführt werden.

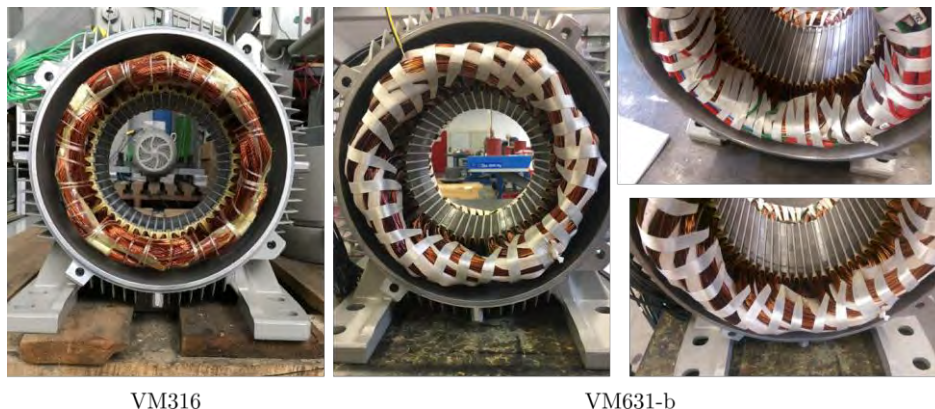


Abb. 24: Konfiguration VM316 als konventionelle dreisträngige Asynchronmaschine und Konfiguration VM631 mit $m = 2 \cdot 3$

Für den drehzahlvariablen Betrieb der Maschinenkonfiguration VM631 wurde ein sechsphasiger Spannungszwischenkreisumrichter entwickelt und aufgebaut. Eine erste, erfolgreiche Inbetriebnahme des Antriebs wurde bereits mit U/f-Steuerung durchgeführt. Zusammenfassend kann von einer erfolgreichen Bearbeitung der im Projektantrag geplanten Arbeitspakete berichtet werden. Die bisherigen Erkenntnisse sind Grundlage für die Initialisierung weiterer Forschungsprojekte.

Kooperation im EnCN

Innerhalb des EnCN ist der Themenbereich der Mehrphasenmaschine sehr eng mit Effizienz-Teilprojekt TPJ 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 dieser Plattform die modellprädiktive

Regelung implementiert werden, um die MPC als geeignetes Ansteuerungsverfahren für Mehrphasenmaschinen bewerten zu können.

Kooperation mit der Industrie

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2018 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 (Abb. 25):



Abb. 25: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft

Aus den Arbeiten im letzten Förderjahr ist ein Folgeprojekt hinsichtlich der Bestimmung der Zusatzverluste durch den Umrichterbetrieb bei Reluktanz-Synchronmaschinen entstanden. Hierbei wurden speziell die Einflüsse verschiedener Modulationsarten der Klemmenspannung sowie Regelungsstrategien auf die umrichterbedingten Stromwärme- und Eisenverluste messtechnisch untersucht und ein Berechnungsmodell zur Vorausberechnung in der Auslegungsphase erstellt.

Besonderen Einfluss auf die umrichterbedingten Stromwärmeverluste haben hierbei 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 Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts MeViSys hat die TH Nürnberg in innovative Schwingungsmesstechnik investiert. Kern des Systems ist ein 3D-Scanning-Laservibrometer (PSV-500-3D). Mit diesem können flächenhaft und berührungslos experimentelle Modalanalysen durchgeführt und Betriebsschwingungsformen ermittelt werden. Durch die Kombination mit den Maschinenprüfständen des Institut ELSYS am EnCN können die Schwingungs- und Geräuscheigenschaften von Maschinen bestimmt werden. Die Messgeräte dienen hierbei der experimentellen Verifikation von Simulationsmodellen. Durch die somit verbesserte Modellgüte können die Energieeffizienz sowie die Geräuschbelastung der Antriebe verbessert werden. Zudem steigert eine geringere Schwingungsbelastung des Antriebs dessen Lebensdauer, was die Ressourceneffizienz des Systems steigert.

Dem Bereich Antriebstechnik am EnCN ist es gelungen Drittmittelprojekte zu generieren, um weitere innovative Maschinenkonzepte zu untersuchen. Mit der Partitioned Stator Flux Reversal Maschine (PS-FRPM) können bei gleichem Drehmoment Permanentmagnete und somit Seltene Erden Material 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.).

Personal

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

Ausblick

Die Ergebnisse der bestehenden Berechnungsmodelle werden zunächst mit Vergleichsmessungen der mehrphasigen Maschinenkonfiguration am Netz verifiziert und bewertet. Desweiteren wird das Betriebsverhalten am Umrichter zunächst analytisch und numerisch abgebildet. Verschiedene Regelungs- und Steuerverfahren werden in die Umrichterplattform integriert und hinsichtlich ihrer Eignung für mehrphasige Wicklungskonfigurationen zur Reduzierung parasitärer Oberschwingungsströme bewertet. Die messtechnische Untersuchung bei Umrichterbetrieb bildet eine Referenz zur Verifikation der entwickelten Oberschwingungsmodelle. Neben der Untersuchung der mehrphasigen Asynchronmaschine ist eine Erweiterung des Forschungsvorhabens auf Synchronmaschinen mit modell-prädiktiven Regelungen (MPC) geplant. Ein entsprechender Projektantrag ist zurzeit in Bearbeitung und mögliche industrielle Partner gefunden.

TPJ 3: Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte für Antriebs- systeme und leistungselektronische Energiesysteme;

Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Armin Dietz, M.Sc. Sebastian Wendel, M.Sc. Philipp Löhdefink, M.Sc. Tobias Schindler, M.Sc. Michael Hoerner, B.Eng. Quoc Viet Bui, 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.

Arbeiten und Ergebnisse

Das Institut ELSYS beschäftigt sich seit nunmehr 3 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 II-Förderphase vor allem die Modelle der MPC-Regelung erweitert sowie die Modellgenauigkeit optimiert. Im zweiten Jahr der Förderphase wurde die Implementierung der Algorithmen fokussiert sowie die experimentelle Validierung. Des Weiteren wurden die bekannten MPC-Strukturen zu einem neuartigen kaskadierten MPC-Ansatz weiterentwickelt. Die genannte Idee wurde zum europäischen Patent angemeldet.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die Modelle zur Vorhersage des Maschinenverhaltens mit verschiedener Detailtiefe der betrachteten 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 beim Betrieb eines Antriebssystems oder einem anderen leistungselektronischen System berücksichtigt werden können (z.B. Schwingungen bei der Zwischenkreisspannung, mechanische Schwingungen an der Antriebsachse). Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde der bereits erwähnte, neuartige und kaskadierte MPC-Algorithmus entwickelt. Der Ablauf der Regelung ist schematisch in Abb. 26 dargestellt. Hierbei wird durch die Aufteilung in ein elektrisches und ein mechanisches Teilsystem eine „längere“ prädiktive Optimierung der Stellsignale ermöglicht. Dies ist vor allem bei mechatronischen Antriebssystemen, wie sie in Fertigungsstraßen eingesetzt werden, vorteilhaft.

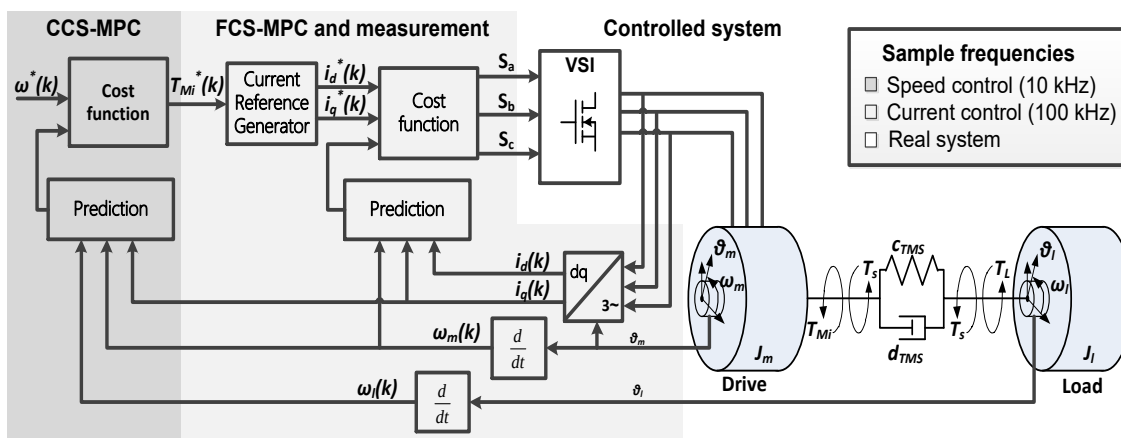


Abb. 26: Kaskadierter modelprädiktiver Regelungsansatz zur Optimierung von mechatronischen Antriebssystemen

Alle erstellten Modelle und Kostenfunktionen wurden anschließend in der Simulationsumgebung (MATLAB/Simulink) erprobt und mit den herkömmlichen Regelungs- und Ansteuerkonzepten (feldorientierte Regelung und direkte Drehmomentregelung) verglichen. Im Anschluss an die Simulation war eine Berechnungsplattform für die experimentelle Evaluierung notwendig. Da die zu berechnenden Algorithmen sehr rechenintensiv sind, war ein Umstieg auf eine stärkere Rechenplattform, im Vergleich zu herkömmlichen Mikrocontrollern, notwendig. Die Auswahl fiel auf das Zynq-7020 ARM/FPGA SoC (Abb. 2), das im Folgenden nur noch als Zynq bezeichnet wird. Das Zynq konnte durch sein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis sowie seiner hardwaretechnischen Flexibilität überzeugen. Da das Institut ELSYS noch wenig Erfahrung mit FPGAs zum Projektstart hatte, hat das Institut die Zynq-Berechnungsplattform in Zusammenarbeit mit Prof. Flaviu Popp-Nowak aus dem Bereich der Digitaltechnik und dem Schaltungsentwurf der TH Nürnberg entwickelt.



Die in der Simulation erprobten Modelle für die unterschiedlichen Regelungsverfahren wurden anschließend mittels Rapid Control Prototyping (RCP) in plattformunabhängigen C-Code für den integrierten Mikrocontroller bzw. in VHDL für das FPGA überführt. Hierbei mussten Ressourcen- und Performancegrenzen der Plattform berücksichtigt werden. Es wurde ein Prototypen-Framework erstellt, welches eine schnelle Implementierung eines veränderten Algorithmus ermöglicht. Hierdurch können die notwendigen Programmierarbeiten bei einem veränderten Algorithmus minimiert werden.

Abb. 27: Eigenentwicklung eines SoC-Systems für die Implementierung der Regelungs- und Ansteuerkonzepte von elektrischen Antriebssystemen

Durch die Integrität von Prozessor und FPGA in dem Zynq-SoC wurden alle zeitkritischen Aufgaben wie die AD-Wandlung, das Auslesen eines Inkrementalgebers, die Generierung von Interlock-Zeiten für die Leistungsschalter sowie die Stromregelung zunächst in Simulink erstellt, erprobt und optimiert. Anschließend wurden für die genannten Subsysteme der HDL-Coder von Mathworks genutzt, um einen IP Core mit VHDL-Code zu erzeugen. Diese IP Cores wurden in Xilinx Vivado, neben manuell geschriebenen IP Cores und vom Hersteller zur Verfügung gestellten IP Cores, integriert, synthetisiert und implementiert. Anschließend erfolgte eine ausführliche experimentelle Erprobung der MPC-Algorithmen am Prüfstand. Hierbei hat vor allem der neuartige kaskadierte Ansatz sehr vielversprechende Ergebnisse gezeigt. So konnte z.B. das Einschwingverhalten deutlich reduziert werden. Durch ein reduziertes Überspringen in Transienten, bei gleichbleibender Dynamik, wird der Betrieb der Antriebssysteme deutlich effizienter. Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten ist die Untersuchung der Algorithmen in Bezug auf die Störanfälligkeit und Stabilität.

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

Kooperation

Innerhalb der EnCN-Effizienz-Arbeitsgruppe ist der vorgestellte Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerverfahren sehr eng mit Teilprojekt TPJ 2 vernetzt. Hierbei soll die MPC als Ansteuerverfahren für die in Teilprojekt TPJ 2 behandelte Mehrphasenmaschine genutzt werden. Hierfür wurde bereits ein Umrichtersystem entwickelt, welches in Zusammenspiel mit der Zynq-Berechnungsplattform die Mehrphasenmaschine ansteuert. Aktuell beginnen die Arbeiten zur Adaption der MPC-Algorithmen auf die mehrphasigen Antriebe sowie die Implementierung der Algorithmen auf die beschriebene Berechnungsplattform. Hierbei sollen die Themenschwerpunkte Modellgenauigkeit und Verlustmodelle gemeinsam konkretisiert werden. Des Weiteren findet eine Vernetzung mit dem Themenfeld von Prof. Dr. Dentel (TH Nürnberg) statt. In diesem Themenbereich sind zwar bedeutend größere Zeitkonstanten wirksam, jedoch sind Überschneidungen bei der Systematik vorhanden.

Darüber hinaus wurde ein weiteres industrielles Forschungsprojekt erfolgreich beantragt mit dem Titel „Modellbasierte und intelligente Kleinantriebstechnik“ (MIKA). Dabei besteht eine Kooperation mit der Afag GmbH und der Kübrich Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG und dem Fördermittelgeber VDI/VDE über eine Projektlaufzeit von 2,5 Jahren. 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.

Außerdem wurde ein weiterer Forschungsantrag gestellt, welcher sich mit der prädiktiven Regelung von mehrphasigen Antrieben für elektrisch fliegende Transportsysteme beschäftigt. Hierbei ist die Energieeffizienz entscheidend für eine möglichst hohe Reichweite.

Des Weiteren wirkt seit November 2017 eine Kooperation 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 aktuell die erste Generation der hochperformanten Berechnungsplattform entwickelt und wird sich 2019 mit der Erprobung beschäftigen. Dieses System bietet eine flexible und schnelle Ansteuerung von neuartigen Antriebssystemen wie z.B. Multilevel-Umrichter und mehrphasigen Antriebssystemen, mit bis zu 180 Ansteuersignalen. Dies ist eine Weiterentwicklung der Berechnungsplattform aus Abb. 27.

Seit Beginn der Förderphase läuft eine kooperative Promotion an der TU München mit dem Titel: Modellbasierte prädiktive Regelung von Kleinantrieben. Betreuender Professor seitens der TU München ist Herr Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik. EnCN-Mitarbeiter und Promovend ist Herr Sebastian Wendel (M. Sc.).

Kooperation mit der Industrie

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2018 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 (Abb. 28):



Abb. 28: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft

Personal

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

Ausblick

Im Jahr 2019 erfolgt ein ausführlicher experimenteller Vergleich mit den bereits bekannten Verfahren zur Ansteuerung von elektrischen Antriebssystemen. Hierbei soll die Innovation der entwickelten MPC-Algorithmen herausgehoben werden. Des Weiteren erfolgt die Adaption der Methodik auf mehrphasige Antriebssysteme, welche im Effizienz-Teilprojekt TPJ 2 betrachtet werden.

TPJ 4: User Interface Design von Energiedaten in energie-intensiven Betrieben;

Hochschule Ansbach, Prof. Dr. Wolfgang Schlüter, M.Sc. Amin Kayatzadeh, M.Sc. Johannes Dettelbacher, M.Eng. Andreas Buswell, B.Eng. Jakob Krieg, B.Eng. Stefan Müller und B.Eng. Fabian Mielke

Einleitung und Motivation

Steigende Energiepreise und scharfer Wettbewerbsdruck erfordern Energieeffizienz sowie steigende Produktqualität bei gleichzeitig stets zu optimierenden Betriebskosten. Das Energie- und Kosteneinsparungspotenzial ist in energieintensiven Industriezweigen, wie z. B. der Nichteisen (NE)-Schmelz- und Druckgussindustrie besonders hoch. In Deutschland werden jährlich 5,9 Mio. t Metall erschmolzen und vergossen, davon 1,1 Mio. t Nicht-Eisen-Werkstoffe. Geht man von dem Energieeinsatz von 2000 kWh pro t guter Guss aus, ergibt sich ein jährlicher Energieverbrauch von 2,2 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 für Gewinn und Wettbewerbsvorteile entscheidend ist und geeignete Maßnahmen für mehr Energieeffizienz in den in starkem internationalen Wettbewerb stehenden Unternehmen unabdingbar sind.

Das oberste Ziel eines Gussbetriebes ist die Sicherung der Produktion der Gussmaschinen durch ausreichende Versorgung mit flüssigem Metall (Abbildung 2). Überlegungen zur Energieeffizienz spielen aktuell bei der Steuerung der Flüssigmetallversorgung keine Rolle. Insbesondere stehen Energiedaten in aufbereiteter Form durch aktuelle Kennzahlen in der NE-Schmelz- und Gussindustrie nicht zur Verfügung. Dies liegt im Wesentlichen an dem vergleichsweise geringen Automatisierungsgrad der Branche.

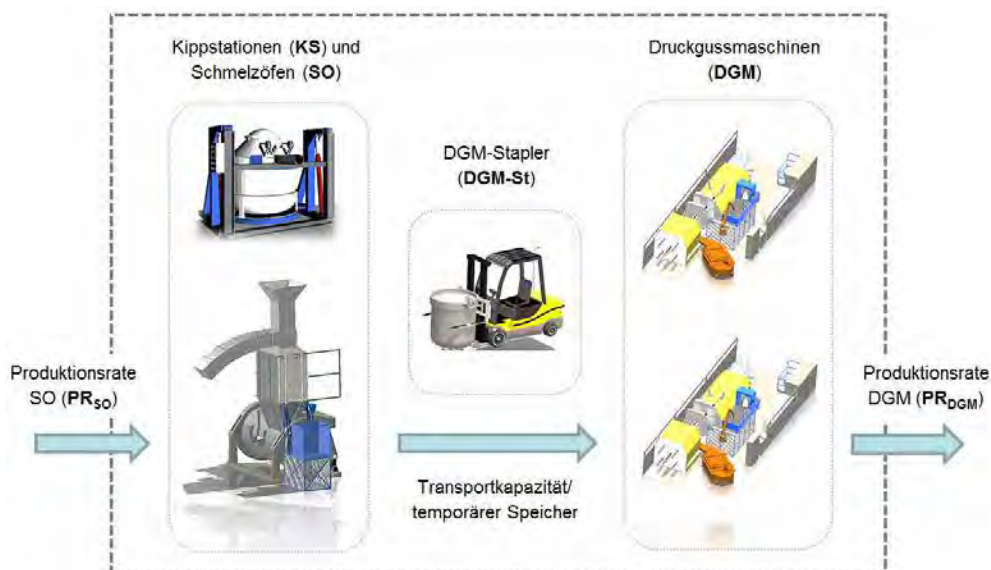


Abbildung 29: Innerbetriebliche Lieferkette des Flüssigaluminiums

Im Projekt „User Interface Design“ von Energiedaten wird prototypisch eine Lösung entwickelt, um den verschiedenen Nutzergruppen Energiekennzahlen auf mobilen Endgeräten in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen und damit einen energieeffizienteren Betrieb bei hoher Produktionssicherheit zu ermöglichen.

Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

Um das Energie- und Kosteneinsparungspotential in der Aluminium-Schmelz- und Druckgussindustrie zur verdeutlichen, wurden in dem Green Factory Bavaria-Projekt E|Melt die Auswirkungen verschiedener intralogistischer Maßnahmen simulativ untersucht. Dazu musste eine vorhandene betriebspezifische Material- und Energieflusssimulation des Betriebsablaufes in einem Schmelz- und Druckgussbetrieb so transformiert werden, dass damit möglichst viele Betriebe

simuliert werden können. Insbesondere für die komplexen Vorgänge in einem Aluminium-Schmelzofen musste dafür ein Simulationsmodell gefunden werden, dass sich mit Hilfe von wenigen Messdaten auf einen spezifischen Schmelzofen kalibrieren lässt. Mit der frei konfigurierbaren Simulation wurden verschiedene Maßnahmen wie die Vorwärmung des festen Materials durch den Abgasstrom der Öfen (Abb. 30), die optimierte Beschickung der Schmelzöfen mit festem Material und die verbesserte Aluminiumverteilung auf die produzierenden Druckgussmaschinen durch eine installierte Staplersteuerung untersucht.

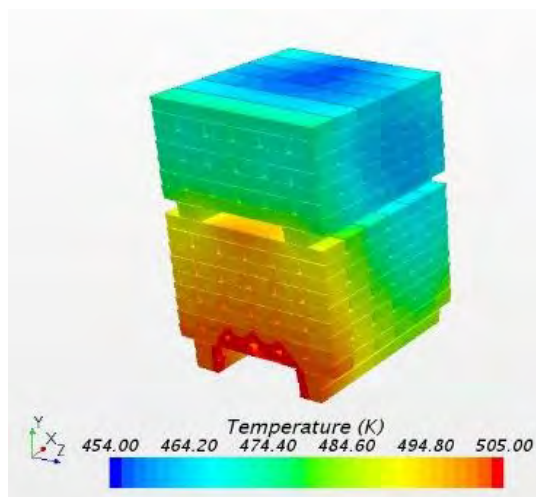


Abb. 30: Strömungssimulation der Materialvorwärmung mit dem Abgasstrom

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, eine Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität (OEE) und eine Erhöhung der Betriebssicherheit festgestellt werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen für einen mittleren Betrieb

	spez. Energieverbrauch	OEE [%]	Ausfall durch Aluminiummangel [%]
Keine Maßnahmen	857	67,9	3,4
Optimierte Beschickung	797	67,8	3,5
Materialvorwärmung	811	67,9	3,5
Verbesserte DGM-Belieferung	833	71,2	0
Alle Maßnahmen kombiniert	706	71,2	0

Durch die freie Konfigurierbarkeit der Simulation lassen sich Betriebe unterschiedlicher Größe simulieren. 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 (Abb. 31).

Digitales Produktionsabbild

Kleine und 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 sollen die Vorteile eines digitalen Produktionsabbildes verdeutlicht und für die Branche sichtbar gemacht werden.

Demonstrator E|Melt

Das Demonstratorsystem "E|Melt" dient der Darstellung und Analyse der Auswirkungen verschiedener intralogistischer Maßnahmen auf die Energieeffizienz, Produktivität und Produktionssicherheit von Betrieben der Nichteisen-Schmelz- und Druckgussindustrie. Hierzu können unterschiedlich dimensionierte Betriebe ausgewählt und mit verschiedenen Maßnahmen kombiniert werden.

Wie funktioniert's?

Konfigurieren Sie Ihre Simulation:

Betriebsgröße:

- ☐ Großer Betrieb: 70.000 t Al/a ?
- ☐ Mittelter Betrieb: 14.500 t Al/a ?
- ☐ Kleiner Betrieb: 8.400 t Al/a ?

Maßnahmenauswahl:

- ☐ Optimierte Beschickung ?
- ☐ Materialvorwärmung ?
- ☐ Verbesserte DGM-Belieferung ?

Visualisierung:

- ☐ Energieeinsparung
- ☐ OEE / Anlageneffizienz
- ☐ Produktionsbilanz

Simulation starten

Abb. 31: Online-Demonstrator zum Aufzeigen der Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

Im Teilprojekt „User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben“ wurde die beim Kooperationspartner pressmetall Gunzenhausen GmbH eingesetzte Software zur Visualisierung von Maschinendaten in einem Druckgussbetrieb weiterentwickelt (Abb. 32). Neben der Optimierung des Produktionsprozesses steht dabei vor allem die Verbesserung der Liefertreue im Fokus. Durch die Bereitstellung von individualisierten Dashboards kann mit der prototypischen Software die Produktionsplanung und -steuerung verbessert werden, was auch zu einer Steigerung der Energieeffizienz führt. 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. Die Bedeutung einer derartigen Anwendung wurde in verschiedenen Vorträgen auf Veranstaltungen des Bundesverbandes Deutscher Gießereiunternehmen in die Branche kommuniziert. In einer Veröffentlichung in der führenden deutschen Fachzeitschrift GIESSEREI wurden Motivation für das Softwarepaket, Umfang und entstehende Chancen detailliert dargestellt. Die Erfahrungen bei der Umsetzung fließen auch in die Arbeit des Projektleiters Prof. Dr. Wolfgang Schlüter im Ausschuss "Gießerei 4.0" ein, in dem der Bundesverband der Deutschen Gießereiunternehmen (BDG) den Mitgliedsunternehmen 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.



Abb. 32: Digitales Produktionsabbild eines Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetriebs im industriellen Einsatz

Data Analytics

Im Rahmen des Projektes mit der pressmetall Gunzenhausen GmbH war der erste Schritt die Erfassung der nur verteilt vorliegenden Maschinendaten. Um die Bedeutung einer zentralen Ablage von Produktionsdaten für historische Betrachtungen zu demonstrieren, wurden spezifisch die Störfälle an den einzelnen Produktionsanlagen statistisch analysiert. Dabei konnte bereits der Mehrwert für die Instandhaltung herausgearbeitet werden, indem durch eine gruppierte Störungsmatrix Maschinen mit spezifischen, häufig auftretenden Fehlern ermittelt wurden. Die statistische Auswertung war die Basis für die Entwicklung eines Softwaretools, mit dem diese Auswertung automatisiert vorgenommen werden kann (Abb. 33). Damit wurde eine erste Basis für eine umfassendere Datenanalyse mit Data Analytics-Methoden gelegt.

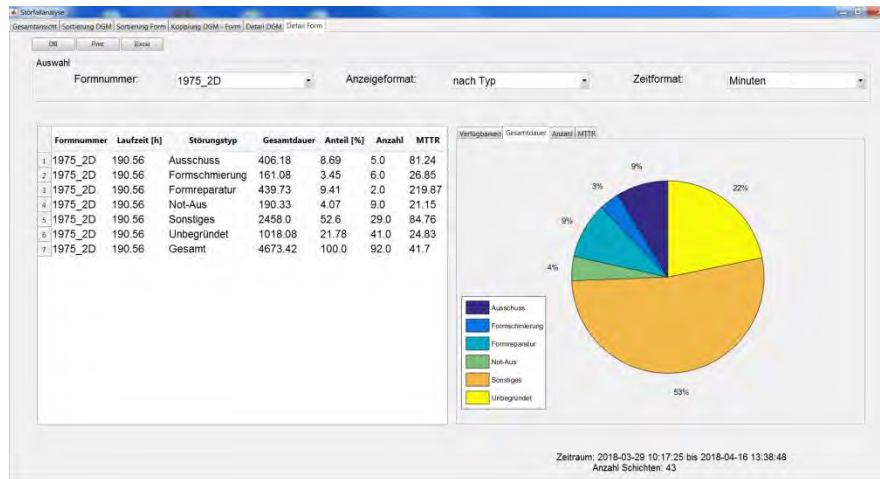


Abb. 33: Software zur automatisierten Bestimmung von störfallanfälligen Produktionskomponenten

Ausblick

Für die beim Kooperationspartner pressmetall Gunzenhausen GmbH eingeführte Software (Abbildung 33) wird die konsequente Weiterentwicklung zu einer webbasierten Lösung angestrebt. Wenn Produktionsdaten über einen längeren Zeitraum digital vorhanden sind, ist der notwendige Input zur Anwendung von Data Analytics-Methoden gegeben. Der Vorteil für die vorbeugende Instandhaltung (Predictive Maintenance) soll für die Branche in einer Pilotanwendung gezeigt werden.

Damit können Produktionsdaten über einen längeren Zeitraum gesammelt werden, der Input und damit die Anwendungsmöglichkeiten von Data Analytics-Methoden erweitern sich.

Bei den Untersuchungen des Schmelzbetriebes sind die hohen Energiemengen aufgefallen, die wegen fehlender thermischer Nutzung der Abgasströme aus den Schmelzöfen verloren gehen. Da die thermische Verstromung die Betriebe vor große intralogistische Probleme stellt, wurde die Möglichkeit einer Abwärmeverstromung mittels einer Mikro-Dampfturbine untersucht. Eine erste Übersichtsrechnung zeigte, dass bei einzelnen Öfen die Verstromung bis zu 100 000 €/a erzielen kann. Mit dem Mikro-Dampfturbinenhersteller Turbonik GmbH, Gewinner des Preises für das beste bayerische Energie-Start-Up-Unternehmen, dem Kompetenzzentrum „Energietechnik“ der TH Nürnberg (Prof. Dr.-Ing. Opferkuch), dem Institut ELSYS der TH Nürnberg (Prof. Dr.-Ing. Dietz) und verschiedenen Firmen aus der Region soll im Rahmen eines Folgeprojektes eine Pilotanlage aufgebaut werden. Dabei stellen die hohen Abgastemperaturen und die schwankenden Abgasströme eine besondere Herausforderung dar, die mit einer modellprädiktiven Regelung und dem Einsatz von simulationsbasierten Methoden bewältigt werden soll.

Im Berichtszeitraum erfolgte die Offenlegung des Patents „Vorrichtung und Verfahren zur Verteilung von Reinigungsintervallen bei Schmelzöfen in einem Schmelz- und Druckgussbetrieb“; Erfinder: Schlüter, W., Dentel, A. und Schmidt, J., Deutsche Patentanmeldung DE10 2016 119702 A1, Anmelder: Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach und Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, angemeldet am 17.10.2016, veröffentlicht am 19.4.2018; Patentklasse B22D 17/30 und weitere [Patent-Anlage 4] .

Schlussworte

Die Arbeitsgruppe EFFIZIENZ hat im Berichtszeitraum alle geplanten Forschungsarbeiten sehr erfolgreich durchgeführt. Als Leuchtturmprojekt für den EnCN kann das Modellvorhaben „Herzo Base - Energiespeicherhäuser“ angesehen werden. Im Frühjahr 2018 zogen die letzten Bewohner in die 8 Reihenhäuser ein und ein einjähriges energetisches Kurzzeitmonitoring wurde gestartet. Bei der passiven und aktiven Gebäudeausrüstung sowie Betriebsweise der Gebäude wurden neue Wege zur Verbesserung der Energieeffizienz aufgezeigt, wobei der energetische Anspruch an KfW 40 Plus-Häuser erreicht wurde. Im Berichtsjahr wurde ein 3-jähriges Folgeprojekt „HerzoOpt“ erfolgreich beantragt. Damit besteht jetzt die einmalige Gelegenheit für ein Langzeit-Monitoring am Reihenhauskomplex. Die Arbeitsgruppe war auch im Jahr 2018 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 31.12.2018 insgesamt 3.935.625 €. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und in neue Laborausrüstung investiert werden. Die Arbeitsgruppe besteht z.Zt. aus 27,5 Mitarbeitern zuzüglich den beteiligten Professoren und den Studierenden, die in Unterprojekten mitarbeiten. An Neuanträgen für Forschungsvorhaben sowie an Entwürfen für wissenschaftliche Publikationen wird derzeit gearbeitet. Mit erfolgreich eingeworbenen Drittmitteln für den Strukturaufbau der TH Nürnberg gelang der Arbeitsgruppe die Inbetriebnahme eines Sekretariats mit einer halbtägigen Teamassistenten im 3. OG von Gebäude 16 (auf AEG). In der Außendarstellung wissenschaftlicher Arbeiten, der Durchführung von Veranstaltungen, Vorträgen, Kooperationen mit Forschungspartnern und Industriebetrieben sowie bei Publikationen ist die Gruppe besonders aktiv. Aus der Arbeitsgruppe haben im Jahr 2018 eine Doktorandin und ein Doktorand ihre Dissertationen erfolgreich an der Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg eingereicht. Beide sind inzwischen promoviert. Außerdem wurden im Berichtsjahr zwei erfolgreiche EU-Anträge gestellt.

Vorträge & Poster 2018

- [1] Allar, C., Wedel, N. und Krcmar, W.: Vortrag „Applikationsmöglichkeiten polymerer Nanofasern im Bau- und Dämmstoffbereich; Jahreskonferenz des EnCN 2018, 13.12.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [2] Krcmar, W. und Raab, B.: „Ziegelexkursion 2018 mit Fachtagung“ für Studierende des Master-Studiengangs Werkstofftechnik, Jacobi Tonwerke GmbH, Bilshausen, 20./21.11.2018.
- [3] Krcmar, W.: Workshop „Kreislauf-Wirtschaft in der Bauindustrie“; Cross-Cluster „Energietechnik/Neue Werkstoffe“, 08.11.2018, Bayern Innovativ, Nürnberg.
- [4] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Vortrag „Optimierung der Struktur keramischer Baustoffe für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Direkt dampferzeuger“; Jahrestreffen 2018 d. Arbeitsgruppe „Speicher A“, Prof. Dr. Karl (FAU), 30.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [5] Kießling, G. und Krcmar, W.: „Herzo Base – Energiespeicherhäuser: Ein Praxisbericht über hochwärmedämmende Wandbaustoffe in Verbindung mit aktuellen Speichertechnologien“; Vortrag anlässlich der Veranstaltung der ENERGIEregion Nürnberg e.V. „Die EnEV 2014/2016 in Theorie und Praxis“, 16.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [6] Krcmar, W.: Vortrag „Wandbaustoffe – Entwicklung höchstwärmedämmender Bau- und Dämmstoffe mit verminderter Wärmeleitfähigkeit“; Vortrag anlässlich Veranstaltung von Bayern Innovativ „Gebäude – Energieeffizienz“, 11.10.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [7] Krcmar, W.: „Effiziente Energienutzung“; Vortrag anlässlich Besuch MdB Katja Hessel im EnCN, 02.10.2018.
- [8] Karsdorf, R., Sappa, D., Kugler, F. und Krcmar, W.: Vortrag „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping; Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus Nürnberg.

- [9] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: Vortrag „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste“; Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [10] Allar, C., Wedel, N. und Krcmar, W.: Forschungsprojekt Nano-FIM: „Zwischenbericht zu erfolgten Arbeiten und bisherige Ergebnisse“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 26.09.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [11] Sappa, D. und Krcmar, W.: „Herstellung und Charakterisierung aerogelmodifizierter Zusatzstoffe und deren Einfluß auf die werkstofftechnischen Eigenschaften portlandzementhaltiger Bindebaustoffe“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 19.09.2018.
- [12] Karsdorf, R. und Krcmar, W.: Vortrag „Einfluss von Gefügeorientierung, Zusatzstoffen, Sinterzeit und -temperatur auf die spezifische Wärmekapazität und Schallausbreitung in Ziegelkeramik“; Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 05.09.2018.
- [13] Gehrman, R. und Krcmar, W.: Vortrag „Häuser drucken“, quick-mix, 14.08.2018, Osnabrück.
- [14] Krcmar, W.: Professorentagung/Exkursion; Weil am Rhein (Vitra Campus), Zürich, Colmar, Basel, Veranstaltung des Ziegelzentrum Süd, 12./15.07.2018.
- [15] Krcmar, W.: Vortrag „Highly insulating building materials“; Visit of Walloon Delegation at EnCN, 26.06.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [16] Krcmar, W.: Vortrag „Hochwärmedämmende Baustoffe“; Informationsveranstaltung des EnCN für Delegation Hochschule Bochum, 29.05.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [17] Krcmar, W. und Allar, C.: „Pilot line for the production of extruded laboratory bricks and extruded geopolymer-foam“; „LightCoc“-Meeting (HORIZON 2020), 24.05.2018, National Technical University of Athens.
- [18] Reich, S., Trotsenko, S., Datsyuk, V., Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: Meilensteinsitzung Forschungsprojekt „NanoFIM“, 08.05.2018, Fakultät Physik, Freie Universität Berlin.
- [19] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel und Putzmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 25.04.2018, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [20] Krcmar, W.; Ullermann, K. und Strohmenger, P.: Präsentationsstand „Energieeffiziente Bau- und Dämmstoffe sowie Brenner- und Ofentechnik“; Messe CERAMITEC 2018, 10.-13.04.2018, München.
- [21] Karsdorf, R. und Krcmar, W.: „Entwicklung höchstwärmedämmender Mauerziegel mit optimierten Schallschutzeigenschaften durch iterative Finite Elemente Simulation und Rapid Prototyping“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 21.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [22] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste“; Vortrag im „Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie“ der Ceramix AG Nürnberg, 21.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [23] Krcmar, W.: Vortrag „Energieeffiziente Baustoffe für Neubau und Sanierung“; Mitgliederversammlung Güteschutz-Ziegel, e.V., 20.03.2018, Würzburg.
- [24] Krcmar, W.: Vortrag „EFFIZIENZ“; 8. Sitzung des EnCN-Fachbeirats, 16.03.2018, Energie Campus Nürnberg.
- [25] Hildebrand, J.-S. und Krcmar, W.: „Künstliche und natürliche Werkstoffe als Speichermedium für spitzenlastfähige Hochtemperatur-Wärmespeicher“; Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, 20.12.2017, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- [26] Kandasamy, K., Bordin, S. und Dentel, A.: „Comparison of different modelling approaches for the prediction of building thermal loads“, Poster anlässlich der Integration of Sustainable Energy Expo & Conference - iSEnEC 2018, Nürnberg, 17. und 18. Juli 2018

- [27] Buderus, J. und Dentel, A.: "Model-based optimization of heat pump operation – Simple vs. detailed approach", Vortrag und Poster anlässlich der Integration of Sustainable Energy Expo & Conference - iSEnEC 2018, Nürnberg, 17. und 18. Juli 2018
- [28] Betzold, C., Dentel, A.: "Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding Photovoltaics production and Efficiency", Vortrag und Poster anlässlich der Integration of Sustainable Energy Expo & Conference - iSEnEC 2018, Nürnberg, 17. und 18. Juli 2018
- [29] Buderus, J., Betzold, C., Bordin, S., Kandasamy, K. und Dentel, A.: „Gegenüberstellung zweier modellbasierter Optimierungen für den Wärmepumpenbetrieb“, Vortrag und Paper anlässlich der BauSim 2018, Karlsruhe, 26.-28. September 2018
- [30] Dentel, A., Betzold, C.: Betriebserfahrungen Herzo Base Energiespeicherhäuser - Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen, Bayern Innovativ, Cluster Forum Gebäude - Energieeffizienz, Nürnberg, 11.10.2018
- [31] Dentel, A., Bordin, S. und Neberich, M.: „Multifunktionale, modulare Fassadenkonzepte“, Vortrag anlässlich des Workshops „Multifunktionale solare Fassaden für die Energiewende“ der Forschungsnetzwerke Energie (BMW), Berlin, 19. und 20. November 2018
- [32] Dentel, A., Betzold, C., Krcmar, W., Hesse, N., Kießling, G., Koutrouveli, K.: Betriebserfahrungen Herzo Base Energiespeicherhäuser - Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen, Der Geothermiekongress 2018, Essen, 28.11.2018
- [33] Stephan, W., Dentel, A.: Heat Pump Ready for Smart Grid – Evaluation of Operation Strategies, Conference on System Simulation in Buildings, Liege, Belgium, Dec. 10th -12th 2018
- [34] Betzold, C., Dentel, A. (2018). Herzo Base – Energiespeicherhäuser: Regelungsstrategien für den optimierten Betrieb von modulierenden Wärmepumpen. Vortrag anlässlich des INServFM Kongresses 2018, Frankfurt/Main, Deutschland, 27. Feb. bis 01. März 2018
- [35] G. Grün: Sensoranwendungen im Gebäude. Sicher vom Sensor in die Cloud. Leistungszentrum sichere vernetzte Systeme, München, 19.6.2018.
- [36] G. Grün: Building Integrated Photovoltaics in Modular Façade Constructions. ISEnEC, Nürnberg, 17.-18.7.2018.
- [37] G. Kontes: Data-driven approach for robust supervisory control in buildings. ISEnEC, Nürnberg, 17.-18.7.2018.
- [38] G. Grün: Aktivierung der Gebäudehülle und Optimierung des Raumklimas im Rahmen von Umnutzungs- oder Sanierungsmaßnahmen. Bayern innovativ Cluster-Forum gebäude – energieeffizienz, Nürnberg, 11.10.2018.
- [39] F. Gallwitz, Interaktive Gebäudevisualisierung – Thermographieaufnahmen mittels Drohnen. Bayern Innovativ Cluster-Forum Gebäude Energieeffizienz, Nürnberg, 11.10.2018
- [40] Schlüter, Wolfgang (2018): Fachausschusssitzung Druckguss. (Vortrag). Fachausschusssitzung Druckguss. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (bdguss). Erl, Österreich, 18.10.2018.
- [41] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): Flexible Materialfluss- und Energiesimulation im Kontext von Industrie 4.0. (Vortrag). ASIM 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg, 04.10.2018.
- [42] Schlüter, Wolfgang (2018): Automatisierungstechnische Anforderungen bei der Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen in der NE-Schmelz- und Druckgussindustrie. (Vortrag). 3. Symposium Gießerei 4.0 in der Praxis. VDG Akademie. Düsseldorf, 21.09.2018.
- [43] Müller, Stefan; Schlüter, Wolfgang (2018): Smart Melting: Increasing Efficiency in Non-ferrous Melting and Die-casting Plants through Incident Management. (Vortrag). iSENEC: Integration of Sustainable Energy Conference 2018. Nürnberg, 17.07.2018.
- [44] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): Hybride Materialfluss- und Energiesimulation eines Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetriebs. (Vortrag). MATLAB Expo 2018. München, 26.06.2018.
- [45] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): E|Melt: Entwicklung eines Demonstrators zum Aufzeigen der Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im NE-Schmelz und Druckgussbetrieb. (Vortrag). Internationaler Deutscher Druckgusstag 2018. Nürnberg, 15.01.2018.

2 Veröffentlichungen 2018

- [1] Schmidt, S., Grotz, T., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Effects of fumed silica on material engineering parameters of external rendering, with special emphasis on thermal conductivity and compressive strength“; ZKG International 10/2018, pp. 42-51.
- [2] Schmidt, S., Sappa, D., Pöllmann, H. and Krcmar, W.: „Improving the thermal insulation properties of thin-bed mortar – Part II: Effects of selected admixtures and combinations thereof on material properties, in particular pore-size distribution, thermal conductivity and compressive strength“, ZKG International 9/2018, pp. 52-67.
- [3] Schmidt, S., Pöllmann, H. and Krcmar, W.: „Improving the thermal insulation properties of thin-bed mortar –
- [4] Part I: Impact evaluations of various admixtures on material engineering parameters“, ZKG International 6/2018, pp. 42-54.
- [5] Schmidt, S.: „Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit“; Einreichung Dissertationsschrift 5/2018, Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg/Prof. Dr. Krcmar, TH Nürnberg/EnCN.
- [6] Schmidt, S. und Krcmar, W.: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung einer Bindebaustoffmischung“; Anmeldung: 28.11.2017. DE, Patentschrift DE 10 2017 128 150.9. Erweiterung der Anmeldung auf EU, China, USA.
- [7] Kränzlein, E., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Metall powders as foaming agents in fly ash based geopolymer synthesis and their impact on the structure depending on the Na/Al ratio“; Cement and Concrete Composites, Vol. 90, July 2018, pp. 161-168, Elsevier.
- [8] Krcmar, W., Kießling, G., Dentel, A., Betzold, C., Koutrouveli, K., Hesse, N., Raab, G. und Schoepe, W.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; In: Bautenschutz - Nachweismethoden und Anwendungen, Herausgeber Helmuth Venzmer; ISBN 978-3-00-060009-8, Edition Bautenschutz Insel Poel, 2018.
- [9] Bordin, S., Kandasamy, K. und Dentel, A.: „Raummodell für ein prädiktives Energiemanagement im Gebäude“, Veröffentlichung in Ingenieurspiegel 1 (2018), S. 32- 34, 2018.
- [10] Georgios D. Kontes, Georgios I. Giannakis, Víctor Sánchez, Pablo de Agustin-Camacho, Ander Romero-Amorrortu, Natalia Panagiotidou, Dimitrios V. Rovas, Simone Steiger, Christopher Mutschler, Gunnar Grün: Simulation-based Evaluation and Optimization of Control Strategies in Buildings. In: Energies 11 (2018), Nr. 12, S. 3376.
- [11] C. Buerhop-Lutz, S. Deitsch, A. Maier, F. Gallwitz, and C. J. Brabec: A Benchmark for Visual Identification of Defective Solar Cells in Electroluminescence Imagery. 35th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, Belgium, September 2018.
- [12] S. Deitsch, C. Buerhop-Lutz, A. Maier, F. Gallwitz, C. Riess, Segmentation of Photovoltaic Module Cells in Electroluminescence Images. <https://arxiv.org/pdf/1806.06530.pdf> (eingereicht bei Elsevier).
- [13] 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. <https://arxiv.org/abs/1807.02894> (eingereicht bei Elsevier).
- [14] P. Löhdefink. Modellbasierte Ermittlung des vorteilhaften Einsatzbereiches geregelter Kaskadenmaschinen. Kleinmaschinenkolloquium, Ilmenau, 2018.
- [15] T. Gerlach; L. Rabenstein; A. Dietz; A. Kremser; D. Gerling. Determination of eddy current losses in permanent magnets of SPMSM with concentrated windings: A hybrid loss calculation approach and experimental verification. Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), April 2018.
- [16] P. Löhdefink; A. Dietz; A. Möckel. Direct Drive concept for Heavy-Duty Traction Applications with the Brushless Doubly-Fed Induction Machine. Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), April 2018.

- [17] S. Wendel; P. Löhdefink; M. Hoerner; A. Dietz; R. Kennel. Dynamic Model Predictive Position Control for Linear Actuators in Automotive Applications. Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), April 2018.
- [18] S. Wendel; B. Haucke-Korber; A. Dietz; R. Kennel. Cascaded Continuous and Finite Model Predictive Speed Control for Electrical Drives. 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Sep. 2018.
- [19] R. Steckel; J. Germishuizen; A. Kremser. Engineering Approach to Calculate the Additional Losses in Inverter Fed RSM and SPMSM. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2018.
- [20] P. Löhdefink; A. Dietz; A. Möckel. Improved Current Control Structure for the Brushless Doubly-Fed Machine Based on a New Equivalent Circuit Model. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2018.
- [21] A. Kremser. Elektrische Maschinen und Antriebe. 5. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2017
- [22] Buswell, Andreas; Henninger, Matthias; Müller, Stefan; Schlüter, Wolfgang (2018): Simulation for Energy Efficiency of Non-Ferrous Melting and Die Casting Plants. In: Casting Plant and Technology International 01/2018, S. 42–47. Online verfügbar unter <https://www.yumpu.com/en/document/view/59909656/cpt-international-01-2018>.
- [23] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): A flexible material flow and energy simulation in the context of Industry 4.0. In: Christina Deatcu, Thomas Schramm und Kay Zobel (Hg.): Tagungsband ASIM SST 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik (AM168). ASIM 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg, 04-05.10.2018. HafenCity Universität Hamburg. Wien: AGRESIM Verlag (ASIM Mitteliung AM, 168), S. 89–95.
- [24] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): E|Melt: Erweiterung einer unternehmensspezifischen Materialfluss - und Energiesimulation zur Abbildung variabler Betriebsstrukturen der Nichteisen-Schmelz- und Druckgussindustrie. In: Tobias Loose (Hg.): Tagungsband Workshop 2018 ASIM/GI-Fachgruppen. ASIM Fachtagung. Heilbronn, 08-09.03.2018. ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation. Wien: AGRESIM Verlag, S. 33–38.
- [25] Buswell, Andreas; Schlüter, Wolfgang (2018): E|Melt: Simulation-driven examination of energy efficiency measures inside non-ferrous melting and die-casting plants. In: Jörg Franke, Michael Scholz und Annika Höft (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production IV. Applied Mechanics and Materials Volume 882. Zürich: Trans Tech Publications, S. 182–189.
- [26] Krieg, Jakob; Schlüter, Wolfgang (2018): Mit einem digitalen Produktionsabbild für die Zukunft gerüstet. In: Giesserei 12/2018 (105), S. 38–42.
- [27] Krieg, Jakob; Schlüter, Wolfgang (2018): Smart Data in medium-sized Aluminium Melting and Die-Casting Industries. In: Barbara E. Hedderich und Walter, Michael S.J., Gröner, Patrick M. (Hg.): Business Meets Technology. Proceedings of the 1st International Conference of the University of Applied Sciences Ansbach 25th to 27th January 2018. Ansbach, 25-27.01.2018. Herzogenrath: Shaker Verlag, S. 42–45.
- [28] Müller, Stefan; Schlüter, Wolfgang (2018): Smart Melting: Increasing efficiency in non-ferrous melting and die-casting plants through incident management. In: Jörg Franke, Michael Scholz und Annika Höft (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production IV. Applied Mechanics and Materials Volume 882. Zürich: Trans Tech Publications, S. 174–181.

3 Patente 2018

- [1] S. Schmidt; W. Krcmar: „Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung der Bindebaustoffmischung“, Deutsche Patentanmeldung der Technischen Hochschule Nürnberg, Aktenzeichen DE 10 2017 128 150.9, 28.11.2017. Im Jahr 2018 wurde der Patentanspruch auf Europa, die USA und China ausgeweitet.
- [2] P. Löhdefink; A. Dietz: „Antriebssystem zum elektromechanischen Antreiben eines mehrspurigen Fahrzeugs sowie entsprechendes mehrspuriges Fahrzeug“, Deutsche Patentanmeldung der Technischen Hochschule Nürnberg, DE4134240C2

- [3] S. Wendel; B. Haucke-Korber; A. Dietz: „Cascaded continuous and finite model predictive control for mechatronic systems“, Europäische Patentanmeldung der Technischen Hochschule Nürnberg, EP18190294.
- [4] Schlüter, W.; Dentel, A.; Schmidt, J.; Vorrichtung und Verfahren zur Verteilung von Reinigungsintervallen bei Schmelzöfen in einem Schmelz- und Druckgussbetrieb, Deutsche Patentanmeldung DE10 2016 119702 A1, Anmelder: Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach und Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, angemeldet am 17.10.2016, veröffentlicht am 19.4.2018; Patentklasse B22D 17/30 und weitere.

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.lee.tf.fau.de

Lehrstuhl für Leistungselektronik

Projektbericht 2018

Der Lehrstuhl für Leistungselektronik (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 gegründet.

Mit der Leistungselektronik steht die Schlüsseltechnologie für das elektrische Energiemanagement im Fokus des Lehrstuhls. Leistungselektronik steuert und wandelt elektrische Energie und findet sich in vielfältigster Weise entlang der gesamten Energiekette wieder. Sie ist Grundvoraussetzung für eine intelligente, effiziente Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie.

Um das Profil des Lehrstuhls in der Außendarstellung zu schärfen, erfolgte 2018 die Umbenennung in „Lehrstuhl für Leistungselektronik“ - unter Beibehaltung des bisherigen Akronymes LEE (für Leistungselektronik). Die Forschungsschwerpunkte am Lehrstuhl liegen im Bereich der Schaltungs- und Systemtechnik für die Leistungselektronik und reichen vom Ausloten der Potentiale moderner Leistungshalbleiterbauelemente über neuartige Integrationstechnologien bis hin zu Fragen der Lebensdauer und Verfügbarkeit, der Netzstabilität und Schutztechnik. Der Leistungselektronik fallen im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung zunehmend auch Aufgabe der Anlagen-, Netz- und Prozessüberwachung zu. Auch hierzu werden innovative Lösungsansätze wissenschaftlich untersucht.

Im Mai 2018 konnte der Lehrstuhl seine neuen Räumlichkeiten am Energie Campus Nürnberg beziehen und verfügt nun über knapp 500 qm Büro- und Laborflächen sowie über zwei Laborhallen mit zusammen etwa 200 qm. Der Aufbau der Forschungsinfrastruktur in den beiden Laborhallen, diese umfasst ein Testfeld für Gleichspannungsnetze und für Mittelspannungsleistungselektronik, liegt im Zeitplan.

Der Lehrstuhl LEE kooperiert sehr eng mit der ebenfalls am Energie Campus Nürnberg untergebrachten Arbeitsgruppe Mittelspannungselektronik des Fraunhofer-IISB. Dazu gehört auch die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur.

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 eines weiteren 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.

Forschungsbericht 2018

KONTAKT

LEHRSTUHLINHABER

Prof. Dr. Martin März

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Fraunhofer IISB



E-Mail

martin.maerz@fau.de

Telefon

+49 911 56854-9310

Web

www.lee.tf.fau.de

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,

daneben Praktika und Seminare. Das Lehrangebot richtet sich in erster Linie an Studierende der Studienrichtungen Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Energietechnik und Mechatronik.

In 2018 wurden 39 studentische Abschlussarbeiten betreut und 37 laufende Promotionen. Die Masterarbeit von Herrn Christian Novak mit dem Titel „Erstellung eines Simulationsmodells für GaN-Leistungshalbleiterschalter“ erhielt den EnCN-Energiepreis 2018 in der Kategorie Energiemanagement-Technologien. Herr Dr. Thomas Heckel (FhG IISB) wurde zusammen mit seinen Kollegen Thomas Schriefer (FAU LEB) und Janina Ziller (FhG IIS) mit dem Innovationspreis Mikroelektronik 2018 ausgezeichnet und Herr Stefan Matlok (FhG IISB) erhielt den SEMIKRON Innovation Award für sein Konzept des „Zero Overvoltage Switching“.



Abbildung 1: Die neuen Räumlichkeiten des Lehrstuhls für Leistungselektronik am Energie Campus Nürnberg.

Vorträge & Poster 2018

- [1] M. März: Niederspannungsgleichstromsysteme - Herausforderungen und Perspektiven. IfKom Ingenieurtag 2018, Nürnberg, 9. März 2018.
- [2] M. März: Laseranwendungen in der Leistungselektronik und Elektromobilität. 21. Seminar „Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik“, Stadthalle Fürth, 07. März 2018
- [3] M. März: Konzepte für das Laden von Morgen. Mobilitätskongress in der Metropolregion Nürnberg, 26. April 2018
- [4] M. März: Advances and Trends in Power Electronics. CKI-Conference 2018, Erlangen, July 27, 2018

Veröffentlichungen 2018

- [5] V. Müller, V.R.H. Lorentz, R. Waller, S. Waldhör, M. Wenger, M. Gepp, R. Schwarz, S. Koffel, S. Wacker, M. Akdere, M. Giegerich, M. März: *Power Antifuse Device to Bypass or Turn-off Battery Cells in Safety-Critical and Fail-Operational Systems*, IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES 2018), Hamilton, New Zealand
- [6] S. Piepenbreier, A. Käß, M. März: *An Investigation of the Parasitic Impedance on the DC-Link Capacitor of EV Drive Inverters*. IEEE 10th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Stuttgart, 2018
- [7] T. Schriefer, M. Hofmann, M. März: *Vibrational resistance investigation of an IGBT gate driver utilizing Frequency Response Analysis (FRA) and Highly Accelerated Life Test (HALT)*. IEEE 10th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Stuttgart, 2018

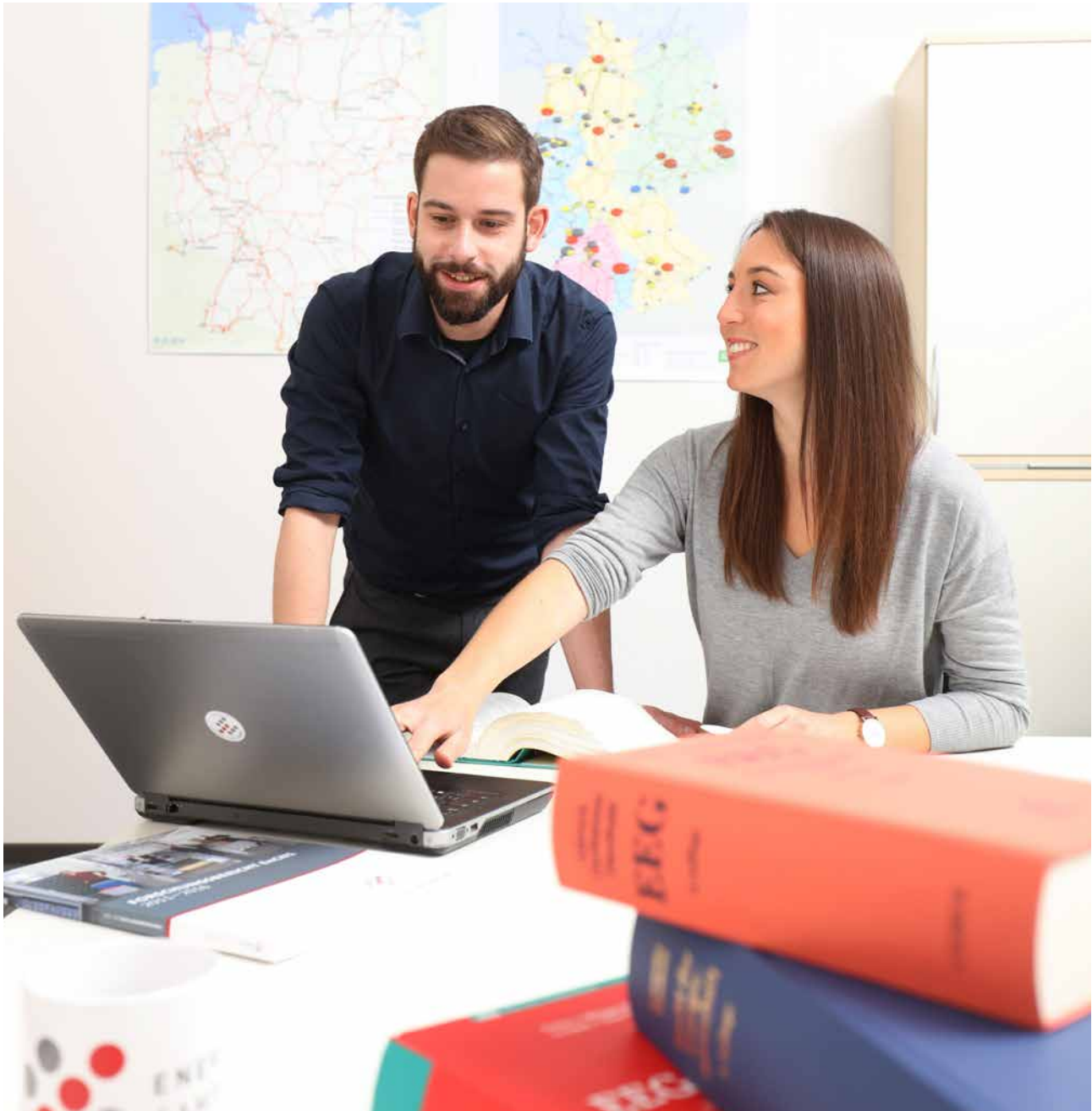
- [8] T. Schriefer, M. Hofmann: *Assessing the vibrational response and robustness of electronic systems by dissolving time and length scale*. IEEE 19th Int. Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EurosimE), Toulouse, 2018
- [9] T. Schriefer, M. Hofmann, H. Rauh, B. Eckardt, M. Maerz: *Parameter study on the electrical contact resistance of axially canted coil springs for high-current systems*. 64th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, 2018
- [10] T. Heckel, S. Zeltner, B. Eckardt, M. Maerz: *Fast Switching with GaN and Dynamic On-Resistance from Application View-Point*. In "The 2018 GaN Power Electronics Roadmap", Journal of Physics D: Applied Physics 51(16), 2018
- [11] O. Kreutzer, M. Billmann, M. März: *Is an antiparallel SiC Schottky diode necessary - Calorimetric analysis of SiC MOSFETs switching behavior*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [12] H. L. Bach, Z. Yu, S. Letz, C. F. Bayer, U. Waltrich, A. Schletz, M. Maerz: *Vias in DBC Substrates for Embedded Power Modules*. 10th Int. Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) 2018, pp. 144-148
- [13] U. Waltrich, C. F. Bayer, S. Zötl, A. Tokarski, S. Zischler, A. Schletz, M. Maerz: *Highly Reliable Power Modules by Pressureless Sintering*. 10th Int. Conf. on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) 2018, pp. 547-551
- [14] B. Eckardt, M. Wild, C. Joffe, S. Zeltner, S. Endres, M. Maerz: *Advanced Vehicle Charging Solutions Using SiC and GaN Power Devices*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [15] H. Gerstner, A. Endruschat, T. Heckel, C. Joffe, B. Eckardt, M. Maerz: *Non-linear Input Capacitance Determination of WBG Power FETs using Gate Charge Measurements*. IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2018, pp. 247-253.
- [16] J. Kaiser, F. Schork, K. Gosses, Y. Han, M. Schulz, L. Ott, B. Wunder, M. Maerz: *Converter Overvoltage Protection for DC-Grids*. IEEE 40th Int. Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2018.
- [17] A. Endruschat, Chr. Novak, H. Gerstner, Th. Heckel, Chr. Joffe, M. Maerz: *A Universal SPICE Field-Effect Transistor Model Applied on SiC and GaN Power Transistors*. IEEE Transactions on Power Electronics, Dec. 2018
- [18] P. Purgat, L. Mackay, M. Schulz, Y. Han, Z. Qin, M. Maerz, P. Bauer: *Design of a Power Flow Control Converter for Bipolar Meshed LVDC Distribution Grids*. IEEE 18th Int. Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest
- [19] K. Gosses, J. Kaiser, L. Ott, M. Schulz, F. Fersterra, B. Wunder, Y. Han, M. Lavery, M. Maerz: *Fault Considerations of Non-Isolated Electric Vehicle Chargers with a Mutual DC Supply*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [20] F. Schultheiss, N.-X. Thinh, A. Endruschat, M. Maerz: *Minimum Volume Design of a Forced-Air Cooled Three-Phase Power Factor Correction Stage for Electric Vehicle Chargers*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [21] O. Kreutzer, M. Billmann, M. Gerner, M. Maerz: *A 3.6 kV full SiC fuel cell boost converter for high power electric aircraft*. IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC) 2018, Long Beach, CA
- [22] A. Pai, T. Reiter, M. Maerz: *Efficiency Investigation of Full-SiC versus Si-based Automotive Inverter Power Modules at Equal Commutation Speed*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [23] L. Ott, Y. Han, B. Wunder, F. Bodensteiner, M. Maerz: *Evaluation of DC-DC-Converter Impedance Passivity using Pseudo-Random Test Signals*. Int. Conf. on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM) 2018, Nuremberg
- [24] H. L. Bach, T. Endres, D. Dirksen, S. Zischler, C. F. Bayer, A. Schletz, M. Maerz: *Ceramic Embedding as Packaging Solution for Future Power Electronic Applications*. Int. Power Electronics Conference (ECCE IPEC) 2018, Niigata

Erfindungsmeldungen, Patente 2018

- [25] D. Malipaard; B. Ruccius, M. März: Stromrichterschaltung
- [26] L. Ott; F. Bodensteiner; B. Wunder: Impedanzmessverfahren

FORSCHUNGSBEREICH

Energiemarktdesign



Sprecherin 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
www.tinyurl.com/gmeo8hg

ENERGIEMARKTDESIGN

Projektbericht 2018

Im Projekt „Energiemarktdesign“ des EnCN² befasst sich ein Team aus Ökonomen, Mathematikern und Juristen (**Abbildung 1**) 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 den 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. 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 Wasserstoffmobilität mit Brennstoffzellen sowie anderen nachhaltigen Kraftstoffen. Durch dieses Themenspektrum werden zunehmend die Voraussetzungen geschaffen, auch Schlüsselfragen der Sektorenkopplung 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.

KONTAKT

PROJEKTKOORDINATORIN

Prof. Dr. Veronika Grimm

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Veronika.Grimm@encn.de

Telefon
+49 911 / 5302 224

Web
www.encn.de



Abbildung 1: Das Team Energiemarktdesign am Energie Campus Nürnberg.

Im Rahmen des Projekts Energiemarktdesign im EnCN² wurden zu diesen Forschungsfragen im Jahr 2018 etwa 30 wissenschaftliche Arbeiten verfasst, die zum Teil bereits in hochrangigen internationalen Zeitschriften publiziert wurden. Ein weiteres Highlight waren die Berufungen von Prof. Dr. Veronika Grimm in den wissenschaftlichen Beirat des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und das Energy Steering Panel der EASAC (European Academies' Science Advisory Council) sowie die Verlängerung des DFG TRR 154 mit Beteiligung mehrerer Forscher aus EMD (Sprecher: Prof. Dr. Alexander Martin). Zudem ist das europäische Marie-Curie Innovative Training Network MINOA (Koordinatorin: Prof. Dr. Frauke Liers) zur gemischt-ganzzahlig nichtlinearen Optimierung gestartet. 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 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. Die öffentliche Wahrnehmung und wissenschaftliche Vernetzung des EnCN profitierte wesentlich von der aktiven Teilnahme an internationalen Konferenzen mit ca. 60 Vorträgen, sowie von der Durchführung von internationalen und nationalen Workshops und Seminaren in Nürnberg. Hervorzuheben ist hierbei die bereits vierte Auflage des Nürnberg-München-Berlin Energy Workshops und die umfangreiche Präsenz auf der iSEnEC Konferenz an der Messe 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 Abschlussarbeiten für Bachelor- und Masterstudenten und ein Seminar in Kooperation mit der N-ERGIE AG boten den Studenten 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 erscheinen wird.

1 Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten

1.1 Modellierung von Strommärkten

Im Forschungsschwerpunkt „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 gemeinsam in mehrstufigen Gleichgewichtsmodellen analysiert werden. Dabei wird untersucht, inwieweit sich alternative Rahmenbedingungen, die im Kontext der Energiewende diskutiert werden, auf Investitionen auswirken können und wie nahe das Ergebnis am Systemoptimum liegt. Die interdisziplinäre Kooperation in der

Modellentwicklung hat bereits in der ersten Förderphase des EnCN wesentlich zur Entwicklung eines mehrstufigen Strommarktmodells (Grimm et al. 2016 [1]) beigetragen und wurde seitdem mit mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu theoretischen (Kapitel 1.2) und angewandten Forschungsfragen (Kapitel 1.3) erfolgreich fortgesetzt. Durch Masterarbeiten, z. B. zu den Themen flexible Verbraucher, regulatorische Unsicherheit und Modellierung von Speichern, konnten Studenten der FAU Erlangen-Nürnberg in die Forschung am EnCN mit eingebunden werden und erste Forschungsansätze zur Kopplung dezentraler Strommärkte mit batterieelektrischer Mobilität erarbeitet werden. 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 [2] und Robinius et al. 2018 [22]).

1.2 Methodenentwicklung für maßgeschneiderte Ansätze und Eindeutigkeit

Bei der Weiterentwicklung und Analyse des Strommarktmodells wurden in der zweiten Förderphase des EnCN diverse Fortschritte erzielt. Krebs, Schewe und Schmidt (2018) [3], Krebs und Schmidt (2018) [4] und Kramer, Krebs und Schmidt (2018) [23] bewiesen grundlegende Aussagen zur Eindeutigkeit von Gleichgewichten in netzgebundenen Märkten für Netzwerke mit und ohne Transportkosten. Für ihre Masterarbeit zu diesem Thema erhielt Vanessa Krebs bereits im Dezember 2017 den Energiepreis des EnCN. Zeitgleich wurden die mathematischen Algorithmen zur besseren Lösung der mehrstufigen Modellstruktur weiterentwickelt – insbesondere zur optimalen endogenen Bestimmung von Preiszonen im Strommarkt (Grimm et al. 2017 [5]; Kleinert und Schmidt 2018 [24]). Außerdem wird in einer weiteren Arbeit ein Algorithmus für mehrstufige Optimierungsmodelle entwickelt, der eine genaue Abbildung von Nachbarländern sowie von endogenen Investitionen in erneuerbare Erzeugungskapazitäten ermöglicht. Diese Erweiterungen sind die Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten in Bezug zu einer Reihe von aktuellen Herausforderungen bei der nachhaltigen Transformation des deutschen Stromsystems im Spannungsfeld des europäischen Strommarktes. Eine Weiterentwicklung der Modelle erfolgt außerdem bei der Abbildung von Flexibilitätsoptionen und Sektorenkopplung, um Forschungsfragen zu dezentralen Märkten besser adressieren zu können.

1.3 Anwendungen

Neben der Weiterentwicklung des Strommarktmodells wurden auch im Jahr 2018 aktuelle Fragen der energiepolitischen Diskussion in Deutschland im Detail beleuchtet. Im Zentrum standen dabei Fragen zu regionalen Steuerungssignalen im Strommarkt, um Investitions- und Produktionsentscheidungen langfristig optimal treffen zu können (Abbildung 2). In einer modellbasierten Optimierung von endogenen Preiszonen mit Anwendung auf den deutschen Strommarkt konnten Ambrosius et al. (2018) [25] zeigen, dass bereits eine kleine Anzahl an optimal konfigurierten Preiszonen zu erheblichen Wohlfahrtsgewinnen führen kann. In Kooperation mit dem Schöller Fellow Dr. Harry van der Weijde werden Auswirkungen von Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Marktdesigns auf Investitionsanreize in Erzeugungs- und Übertragungskapazität untersucht. Es zeigt sich, dass schon eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Einführung von Preiszonen zu veränderten Investitionsentscheidungen führt, sowohl beim Leitungsausbau, als auch bei Technologiemix und regionaler Verteilung der Erzeugungsinvestitionen.

In Grimm et al. (2018) [25] wird das Strommarktmodell von Grimm et al. (2016) [1] so angepasst, dass es zur Modellierung von realen Strommärkten verwendet werden kann. Mit einer Kalibrierung für den deutschen Strommarkt für das Jahr 2035 wird gezeigt, dass verschiedene Marktdesignanpassungen, z.B. die Einführung einer zweiten deutschen Preiszone oder die systemdienliche Abregelung von Erneuerbaren Energien bei negativen Strompreisen und beim Engpassmanagement, zu substantiellen Wohlfahrtsgewinnen und Einsparungen beim Netzausbau führen können. Eine Untersuchung zu Kosten- und marktbasierendem Redispatch als Instrument des Engpassmanagements in Strommärkten mit Preiszonen (Grimm et al. 2018 [26]) zeigt, dass marktbasierter Redispatch im Vergleich zu kostenbasierendem Redispatch zu Wohlfahrtsverlusten führen kann, wenn die Netzbetreiber, die den optimalen Redispatch bestimmen, dabei mit dem Ziel der Minimierung ihrer Redispatchkosten agieren. Grimm et al. (2019) [27] untersuchen regionale Investitionsanreize mittels einer regional differenzierten Netzentgeltkomponente (G-Komponente) und zeigen, dass diese zwar in der Lage sind lokale Investitionsanreize für neue Erzeugungsanlagen zu setzen, kurzfristig aber zu keinen differenzierten Preissignalen am Strommarkt führen. Dadurch können im Gegensatz z.B. zu einem Nodalpreissystem keine signifikanten Auswirkungen auf die Wohlfahrt oder den Netzausbau festgestellt werden.

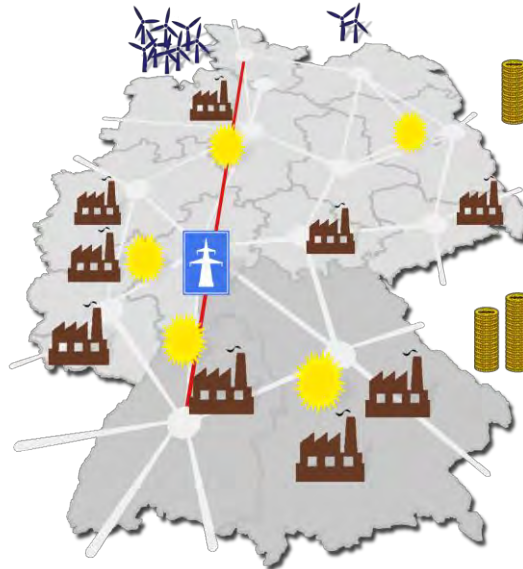


Abbildung 2: Räumliche Betrachtung von Deutschland und den Nachbarstaaten in der Modellierung. Eigene Darstellung.

In weiteren anwendungsorientierten Forschungsarbeiten zur Rolle flexibler industrieller Verbraucher zeigen Ambrosius et al. (2018) [6], dass ein flexibler Stromverbrauch durch die Industrie nicht nur zu deutlich geringeren Stromkosten für flexible Konsumenten führt, sondern auch zu einem reduzierten Bedarf an Netzausbau. Um diese Effekte zu erzielen, sind regionale Anreize von besonderer Wichtigkeit. Auf Basis des Gutachtens für die Monopolkommission [G1] wird aktuell auch an Auktionsformaten für Erneuerbare Energien Auktionen, insbesondere deren Einfluss auf die Höhe der Einspeisevergütung und die regionale Verteilung bezuschlagter Kraftwerksprojekte, geforscht. Hierfür werden in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Entscheidungstheorie (Prof. Bichler, TUM) unterschiedliche Auktionsregimes mithilfe numerischer Simulationen analysiert, um ausgehend vom aktuellen Status Quo das mit Blick auf Kosten, lastnahe Ansiedlung der Kraftwerke sowie Komplexität und Umsetzbarkeit wohlfahrtsoptimalste Auktionsregime zu identifizieren.

Die Sichtbarkeit der Forschergruppe konnte im Jahr 2018 wesentlich ausgebaut werden. Die Gutachten der vergangenen Jahre [G1–G5] sind umfangreich in die politische Diskussion eingeflossen und haben zu einer Wahrnehmung der Aktivitäten des EnCN in der Bundespolitik beigetragen. Die Teilnahme an Expertenveranstaltungen in Bonn (Bundeskartellamt), Berlin (BMW, BMJV) und in der Metropolregion Nürnberg ermöglichte einen Austausch mit nationalen und lokalen Stakeholdern zu Fragen von Netzausbau und Dezentralität in der Energiewende und zu Smart Markets. Ebenso fanden verschiedene Hintergrundgespräche mit Abgeordneten des Bundestags zu energieökonomischen Themen statt.

In den kommenden Jahren werden die aktuell laufenden Aktivitäten fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung der Methoden im Hinblick auf dezentrale Strommärkte sowie deren Kopplung mit der Wärmeversorgung und innovativen Mobilitätskonzepten und auf Auktionsformaten für Erneuerbare Energien. Die Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B ist mit ersten gemeinsamen Veröffentlichungen gut gestartet und soll weiter ausgebaut werden. Eine enge Zusammenarbeit soll auch im Rahmen eines Doktorandenprojekts (Betreuer: Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Martin Schmidt) im von der EU geförderten Marie-Curie ITN MINOA hergestellt werden. Im Doktorandenprojekt soll der deutsche Strommarkt mit Hilfe von Datenanalysemethoden untersucht werden.

1.4 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Mirjam Ambrosius, Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Thomas Kleinert, Vanessa Krebs, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, PD Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Bastian Rückel, Philipp Runge, Christian Sölch, Prof. Dr. Gregor Zöttl

2 Ökonomische Analyse von Gasmärkten

2.1 Modellierung von Gasmärkten

Im zweiten Forschungsschwerpunkt „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 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 Forscher aus EnCN EMD als Teilprojektleiter beteiligt sind (Grimm, Liers, Martin, Schewe, Schmidt, Zöttl). Für den TRR 154 wurde im vergangenen Jahr die 2. Phase von 2018-2022 bewilligt, sodass die Kooperation dieser beiden Forschungsprojekte weitergeführt und durch ein neues Teilprojekt im TRR 154 zur Modellierung von Buchungen erweitert werden kann. Mit der mathematischen Beschreibung eines mehrstufigen Gasmarktpproblems (Grimm et al. 2018 [7]) wurde der formale Rahmen für die zukünftige Analyse von Entry-Exit Gasmärkten geschaffen. 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. Während im Rahmen des TRR 154 intensiv an mathematischen Grundlagen zur Lösung der zu betrachtenden Probleme geforscht wird, wurde für die anwendungsorientierte Forschung am EnCN über den deutschen Gasmarkt ein Modelldatensatz erstellt, der historische Marktdaten und eine vereinfachte Darstellung des Netzes, der Verdichter und der Übergabepunkte zu Nachbarzonen und Endverbrauchern beinhaltet. Auf dieser Basis werden aktuell Forschungsfragen bezüglich der Bereitstellung von Marktkapazitäten sowie ein Vergleich verschiedener Marktdesigns untersucht. Außerdem werden Verfahren, die optimale Ausbauentscheidungen für sogenannte potentialgetriebene Transportnetze, zu denen auch Gastransportnetzwerke zählen, am EnCN entwickelt (Robinius et al. 2018 [22]). Eine weitere – auf den in Robinius et al. (2018) [22] entwickelten Verfahren basierende – Publikation in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich mit einem stärkeren Anwendungsfokus ist für 2019 in Planung. Zuletzt wurde in dem Artikel Labbé et al. (2018) [28] das europäische Buchungssystem im Gasmarkt theoretisch analysiert. Diese Kooperation mit der Université Libre de Bruxelles besteht auch weiterhin und stärkt somit das internationale Profil des Energie Campus Nürnberg.

2.2 Anwendungen

Grimm et al. (2018) [7] beschreiben in ihrer oben genannten Veröffentlichung ein mehrstufiges Optimierungsproblem, das den zeitlichen Ablauf des europäischen Gasmarktes innerhalb einer Entry-Exit Zone widerspiegelt. Wie in Abbildung 3 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. Schewe et al. (2018) [29] untersuchen dazu strukturelle Eigenschaften des Lösungsraums der möglichen Buchungskapazitäten. 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. Hierbei kann vielfach auf die grundlegenden Ergebnisse des SFB TRR 154 zurückgegriffen werden (Aßmann et al. 2018 [8–9]; Geißler et al. 2018 [10]; Grimm et al. 2019 [11]; Groß et al. 2018 [12]; Gugat et al. 2018 [13–14]; Hiller et al. 2018 [15]; Mehrmann, Schmidt und Stolwijk 2018 [16]; Schewe und Schmidt 2018 [17]; Schmidt, Sirvent und Wollner 2018 [18]).

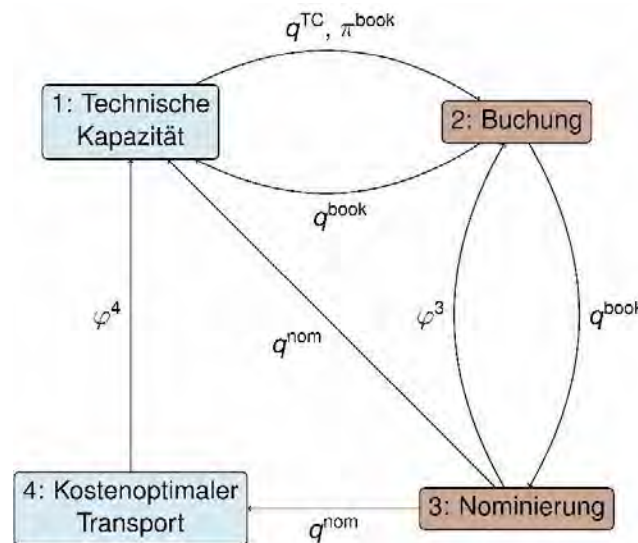


Abbildung 3: Abhängigkeiten in dem mehrstufigen Modell des Europäischen Entry-Exit Systems. Vgl. Grimm et al. (2018) [7].

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 (Abbildung 4). Für den deutschen Gasmarkt wurde für eine der beiden Marktzone bereits ein Datensatz erstellt. 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. Im nächsten Schritt werden die Marktergebnisse des historischen Entry-Exit Gashandels mit einem Wohlfahrtsoptimum unter Berücksichtigung der physikalischen Flussbedingungen verglichen.

Wie im Strommarkt und dem zugrundeliegenden Transportnetz spielt auch der Leitungsausbau in Gas- und Wasserstofftransportnetzen eine wichtige Rolle. In diesem Forschungsschwerpunkt wird daher an der Bestimmung von optimalem Netzausbau gearbeitet – insbesondere unter Berücksichtigung der Modellierung des Gas- bzw. Wasserstoffflusses mithilfe potentialgetriebener Flussmodelle sowie unter Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Ein- und Ausspeisedaten (Robinius et al. 2018 [22]). Die resultierenden Probleme sind mathematisch sehr herausfordernd.

Im Jahr 2018 konnte die Datensammlung und Validierung für die modellbasierte Abbildung des deutschen Gasmarktes abgeschlossen werden. 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) soll die mathematische Analyse von Marktthemen eine größere Rolle spielen. Ein enger Bezug soll auch zu dem BMBF-Projekt EiFer (Prof. Dr. Schmidt und externe Partner) hergestellt werden, das zum 01.01.2018 startete. EiFer studiert mathematische Fragestellungen bei Fernwärmenetzen.

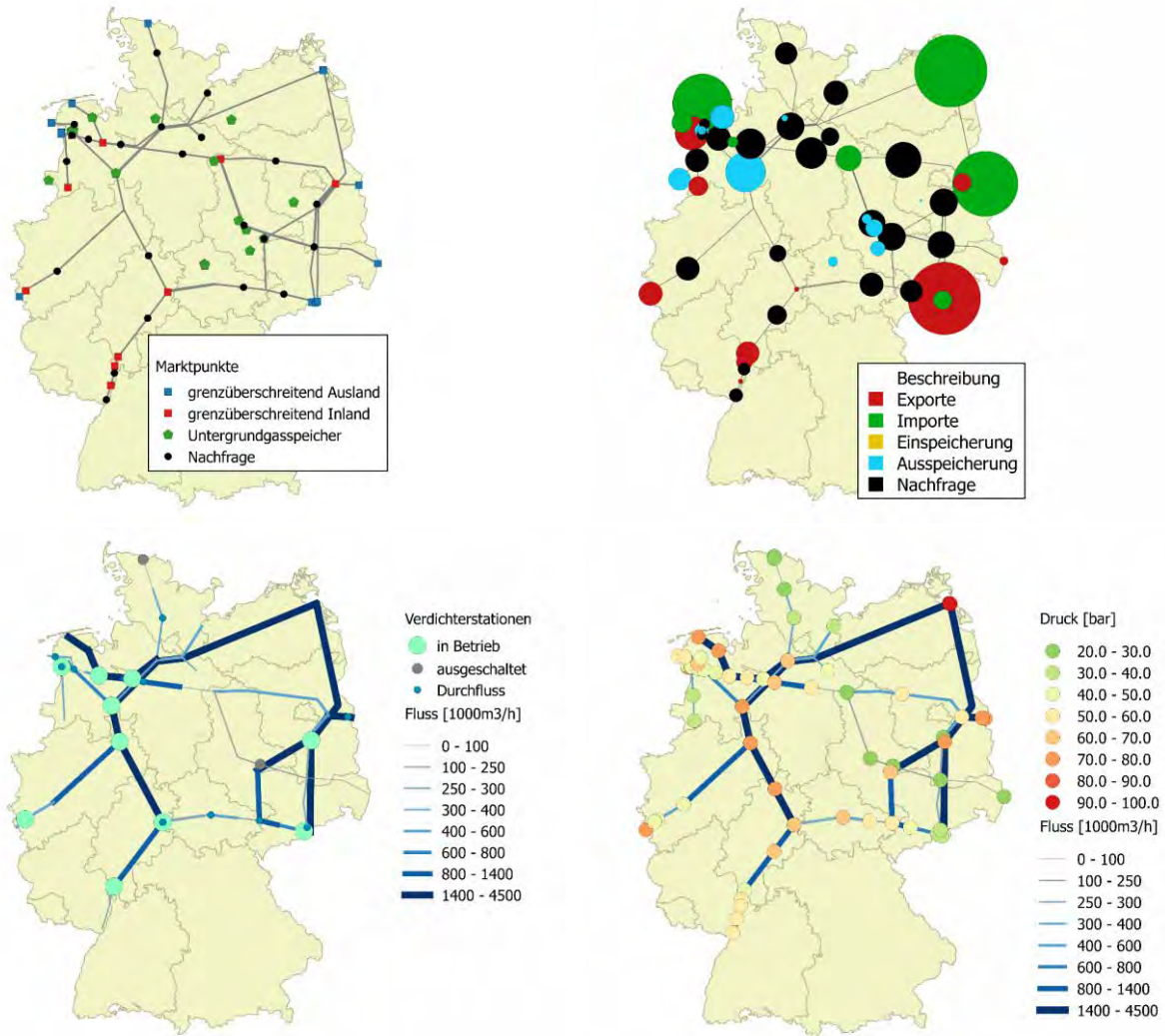


Abbildung 4: Darstellung der GASPOOL Markregion: wichtige Pipelines sowie Markt- und Nachfragepunkten (links oben), Ein- und Ausspeisung an einem Wintertag (rechts oben), Modellergebnisse: Gasflüsse und Betrieb von Verdichterstationen (links unten) Gasflüsse und Druckniveaus an Netzknoten (rechts unten). Eigene Darstellung.

2.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Dr. Jonas Egerer, Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, PD Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Johannes Thürauf, Prof. Dr. Gregor Zöttl

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 Forschungsschwerpunkt „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 [30]). Haußner und Ismer (2018) [19] betrachten die rechtlichen Rahmenbedingungen des Speicherbetriebs mit Blick auf die Entflechtung auf Verteilnetzebene. Darauf aufbauend werden derzeit Szenarien mit verschiedenen Regulierungsregimen untersucht und quantitativ bewertet. In laufenden Arbeiten mit stärkerem mathematischem Fokus werden diese verschiedenen Perspektiven ergänzt, indem optimale Tarifstrukturen auf der Endverbraucherebene in Smart Grids mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme bestimmt werden.

3.2 Anwendungen

Aufbauend auf der juristischen Studie zum Speicherbetrieb und zur Entflechtung auf Verteilernetzebene (siehe Haußner und Ismer, 2018 [19]), wurden in einem laufenden Projekt zwischen Ökonomen und Juristen alternative Vertrags- und Ausschreibungsszenarien abgeleitet, welche dem Verteilnetzbetreiber ermöglichen könnten, in den rein gewinnmaximierenden Speicherbetrieb von privaten Betreibern einzugreifen. Ziel dieser Ansätze ist es, eine Kostenreduktion des Netzausbaus und der Netzbewirtschaftung herbeizuführen. Zur Quantifizierung der Einsparungen in den jeweiligen Szenarien wurde ein dreistufiges Optimierungsmodell entwickelt, das es erlaubt, die möglichen Effizienzgewinne zu identifizieren (Abbildung 5). Das Modell wurde im Rahmen einer Fallstudie mit Daten aus einer Smart-Grid Feldstudie kalibriert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung der Rahmenbedingungen, welche eine Mehrfachnutzung von Speichern ermöglicht, Investitionsanreize für Speicher generieren und dadurch zu einer Reduzierung des notwendigen Netzausbaus führen kann. Im Gegensatz dazu gibt es in einem Referenzszenario ohne Anpassung der Rahmenbedingungen keine Investitionsanreize für Speicher. Im Laufe des Jahres 2019 wird, aufbauend auf der juristischen Studie aus dem Jahr 2018, eine tiefergehende Diskussion des zukünftigen europäischen Strommarktdesigns mit Blick auf die Speicherintegration erfolgen. Diese wird mit einer Erarbeitung der möglichen Vertrags- und Ausschreibungsszenarien komplementiert.

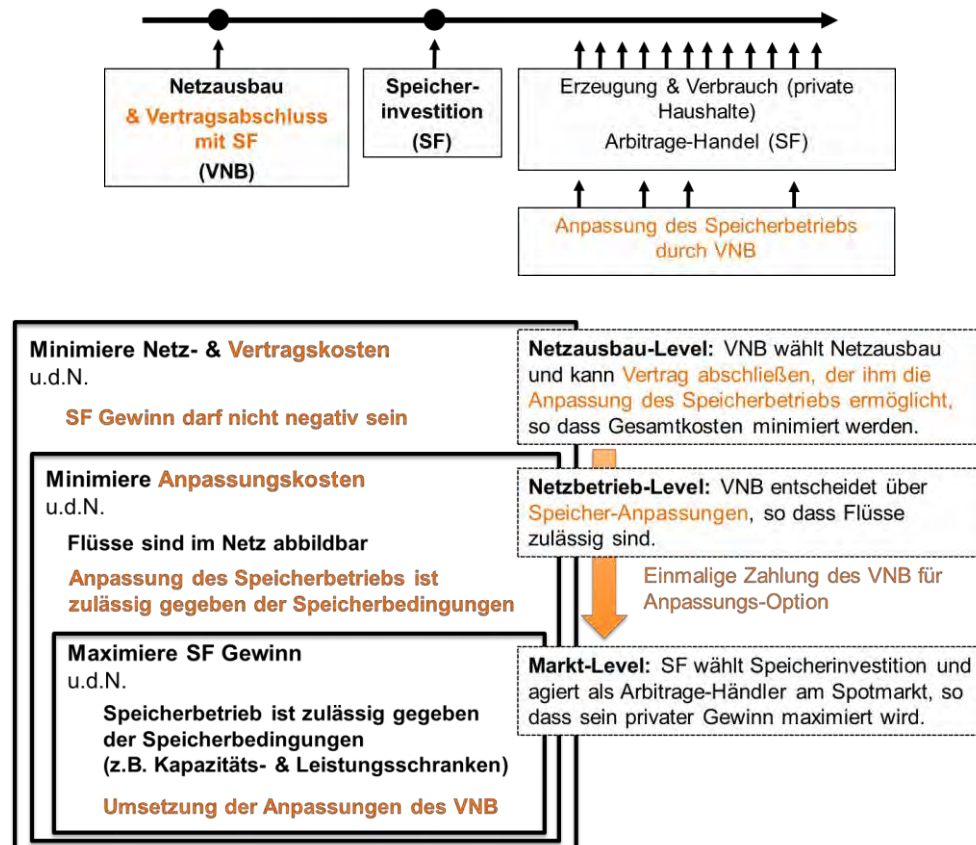


Abbildung 5: Oben (Bild1): zeitlicher Ablauf der Entscheidungen von reguliertem Netzbetreiber und privatem Speicherbetreiber, wenn die Mehrfachnutzung von Speichern rechtlich möglich ist; unten (Bild2): schematische Darstellung des dreistufigen Optimierungsproblems zur Abbildung der Mehrfachnutzung von Speichern. Eigene Darstellung.

In einer laufenden Forschungsarbeit zur Stromversorgungstarifizierung auf der Endverbraucherebene untersuchen Grimm, Orlinskaya, Schewe, Schmidt und Zöttl mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme verschiedene Möglichkeiten der flexiblen Preisgestaltung für Endkunden mit eigenen Stromproduktionsanlagen und Energiespeichern. Dieser sogenannte Prosumer strebt 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 weiter und antizipiert für die Festlegung der flexiblen Tarifkomponenten das Verhalten des Prosumers. Dabei müssen die Tarifbedingungen für den Prosumer jeweils mindestens so attraktiv sein, wie bei einem auf dem Markt üblicherweise angebotenen Fixpreistarif. Betrachtet werden außer Fixpreistarif noch Real-Time-Pricing mit direkter Weitergabe der Börsenpreise an den Prosumer, sowie zwei Tarife, die eine mehrstufige Modellierung erfordern: (i) Time-of-Use 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 flexibel bepreisten Tarife bewirken beim Prosumer Verhaltensänderungen (Abbildung 6), 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 kostenoptimalen Plänen vom 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.

Bohlayer und Zöttl (2018) [20–21] 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.

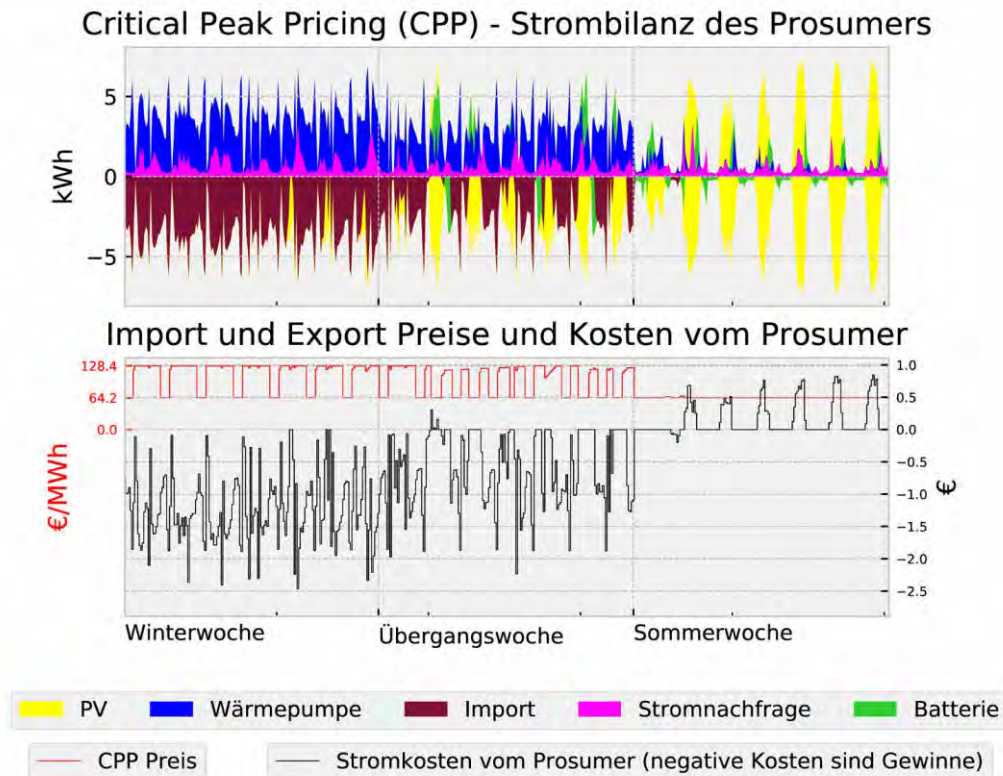


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Preise und Strombilanz für den Prosumer. Eigene Darstellung.

Die Wissenschaftler im Forschungsschwerpunkt führen die erfolgreichen Kooperationen mit Wissenschaftlern aus anderen Projekten des EnCN fort, die auf vergangenen gemeinsamen Förderprojekten basieren. Zu erwähnen ist hier die Kooperation mit Prof. Dr. Luther (EnCN-Netze) und Prof. Dr. German (EnCN-Speicher A) im Rahmen des „SWARM“-Projekts (gefördert durch die N-ERGIE AG). Außerdem wird die Ausbildung an der Schnittstelle Wirtschaftstheorie-Mathematik-Elektrotechnik im Elite-Masterprogramm „Advanced Signal Processing and Communications Engineering“ der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg vorangetrieben (Beteiligung von Prof. Dr. Veronika Grimm und Prof. Dr. Frauke Liers, gefördert durch das Elite Netzwerk Bayern, ENB). Der Folgeantrag für dieses Projekt ist gestellt und wird im Jahr 2019 entschieden. Im Graduiertenprogramm „Evidence Based Economics“ gemeinsam mit der LMU München und der Universität Regensburg (ebenfalls gefördert durch das ENB) wird die Doktorandenausbildung im Bereich der evidenzbasierten, quantitativen Wirtschaftsforschung auf einem hohen Niveau vorangetrieben. Der Anschluss der EnCN-Wissenschaftler an die betriebswirtschaftliche Forschung wurde im Rahmen des „Emerging Fields Initiative“ Projekts „Sustainable Business Models in Energy Markets: Perspectives for the Implementation of Smart Energy Systems“ der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg initiiert und ist heute im Forschungsschwerpunkt „Energienmärkte und Energiesystemanalyse“ des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften fest verankert. An dem Schwerpunkt beteiligt sind die Professorinnen und Professoren Beckmann, Fürst, Gatzert, Grimm, Ismer, Voigt, Zöttl (Fachbereich Wirtschafts- und Sozialwissenschaften), sowie Liers, Martin, Schmidt (Department Mathematik, als Zweitmitglieder des WiSo-Fachbereichs). Ein enger Bezug soll auch zu dem BMBF-Projekt Verteilnetze (Prof. Dr. Liers, Prof. Dr. Martin und externe Partner) hergestellt werden, das zum 01.01.2018 startete. In dem Projekt werden mathematische Fragestellungen betrachtet, die bei der Steuerung von Stromnetzen unter fluktuierender Einspeiseunsicherheit entstehen.

3.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

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

4 Schlussworte

Im Jahr 2018 konnte der Forschungsbereich Energiemarktdesign des EnCN weiter erfolgreich vorangetrieben werden. Die Ergebnisse der Forschung wurden auf zahlreichen hochangesehenen Fachtagungen und auch im Rahmen der Politikdiskussion 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 „Energienmärkte 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 im Rahmen von innovativen Mobilitätskonzepten bieten an der Schnittstelle ein großes Potenzial für weitere Forschungsvorhaben. Die Vernetzung mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern wurde im Rahmen von Workshops weiter vorangetrieben. Daran anknüpfend wird unmittelbar im Februar 2019 ein weiterer Workshop zur Energiemarktmodellierung mit TUM, ifo, DIW und TUB stattfinden, außerdem werden Ergebnisse der Forschung am EnCN auf dem „Mathematics of Energy“ Workshop am Newton Institute der University of Cambridge im April/Mai 2019 präsentiert. Im März 2019 wird darüber hinaus der Industrieökonomische Ausschuss des Vereins für Socialpolitik, der größten deutschen Ökonomenvereinigung, seine Jahrestagung am EnCN ausrichten. Im Rahmen der 100-Jahr-Feier der Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften werden verschiedene Aktivitäten auch die Forschungsschwerpunkte von EnCN-EMD beleuchten.

Durch die Berufung von Prof. Schmidt an die Universität Trier und von Dr. Schewe an die University of Edinburgh wird es zu einer umfangreichen Kooperation mit diesen Einrichtungen kommen. Prof. Schmidt und Dr. Schewe werden dem EnCN als Fellows eng verbunden bleiben. Darüber hinaus ist angedacht, durch ein Fellowship-Programm weitere Kooperationspartner enger an den Forschungsbereich EMD zu binden. Eine Verstärkung der Forschungsschwerpunkte des EnCN wird sich im kommenden Jahr durch die Berufung von vier W1 Tenure Track-Professuren ergeben, von denen eine unmittelbar den Forschungsbereich EMD verstärken wird und am Fachbereich Wirtschafts- und Sozialwissenschaften angesiedelt ist.

5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

Prof. Dr. Veronika Grimm war im Jahr 2018 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- 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“, zusammen 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 „Energiamärkte 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 2018 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- 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 2018 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 (seit 2016)
- Mit-Herausgeberin von „Mathematical Methods of Operations Research“ (seit 2015)

Prof. Dr. Alexander Martin war im Jahr 2018 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- 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)

Prof. Dr. Martin Schmidt war im Jahr 2018 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Technical Editor der internationalen Zeitschrift "Mathematical Programming Computation"

PD Dr. Lars Schewe war im Jahr 2018 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Technical Editor der internationalen Zeitschrift "Mathematical Programming Computation"

Die Arbeit von Mitarbeitern im Projekt Energiemarktdesign wurden im Jahr 2018 mit folgenden Preisen ausgezeichnet:

- **Mirjam Ambrosius.** Best Scientific Presentation Award auf der 12th Conference on Energy Economics and Technology in Dresden für das gemeinsame Projekt „Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning“ mit Veronika Grimm, Thomas Kleinert, Frauke Liers, Martin Schmidt und Gregor Zöttl. Technische Universität Dresden, 27.04.2018.
- **Dr. Jonas Egerer.** Förderung der Emerging Talent Initiative für das Projekt „Optimal regional decisions for the sustainable transformation of electricity markets“. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Juli, 2018.
- **Philipp Runge.** Energiepreis des EnCN e.V. für seine Masterarbeit. „Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035“. Energie Campus Nürnberg, 13.12.2018.

Im Bereich Energiemarktdesign waren im Jahr 2018 folgende Personen zu Gast:

- Dr. Huppmann Daniel (IASSA Wien). 10./11.01.2018
- Prof. Dr. Martin Bichler (TU München). 18.01.2018
- Prof. Dr. Martine Labbé (Université Libre de Bruxelles). 04.02.2018 - 06.02.2018
- Dr. v.d. Weijde Harry (University of Edinburgh). Schöller Fellow im Jahr 2018/2019
- Prof. Dr. Steven Gabriel (University of Maryland). 21.-23.10.2018
- Dr. Pirlot Alice (University of Oxford). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 25.10.2018
- Dr. Mathur Aparna (American Enterprise Institute). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 25.10.2018
- Ass. Prof. Dr. Sadowsky Marilyne (University Panthéon-Sorbonne). FAU-SIT: Seminar on International Taxation 15.11.2018
- Prof. Dr. Haslehner Werner (University of Luxembourg). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 22.11.2018
- Ass. Prof. Dr. Vella John (University of Oxford). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 04.12.2018
- Prof. Dr. Stankiewicz Lukasz (University of Lyon). FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 03.05.2018
- Ass. Prof. Dr. Pantazatou Katerina (University of Luxembourg) FAU-SIT: Seminar on International Taxation, 26.04.2018
- Prof. Johnston Angus (University of Oxford). Principles of European Law, 15./16.12.2018
- Prof. Dr. Duso Tomaso (DIW Berlin). NRSE, 12.12.2018

Presseauftritte:

- Interview in BR5 aktuell, Radiosendung - Der Funkstreifzug: "Energieversorgung: Ist dezentral wirklich besser oder nur teurer". Prof. Dr. Veronika Grimm. 02.01.2019.
- TV-Auftritt in alpha-demokratie: „Diskussion zu ‚Die Bundesnetzagentur‘: Begriffe, die tagtäglich in den Nachrichten vorkommen - wer versteht sie wirklich?“ Im Studio dazu ist Professor Doktor Gregor Zöttl von der FAU Erlangen-Nürnberg. 08.05.2018.

6 Ausgerichtete Workshops

- [1] „Friday@Noon - Bavarian Workshop on Optimization“ (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg und Universität Augsburg), Universität Augsburg, 16.11.2018
- [2] Konferenz „Gender Economics and the Workplace“, FAU Erlangen-Nürnberg, 08.11.2018 – 09.11.2018
- [3] 6. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 26.10.2018
- [4] 2. Konferenz „Mathematics of Gas Transport“ (organisiert gemeinsam vom TRR154 und dem Forschungscampus Modal), Zuse Institut Berlin, 10.10.2018 – 11.10.2018
- [5] 5. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 20.07.2018
- [6] 4. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 20.04.2018
- [7] 1. AIP-IIS-MLGT Workshop (organisiert gemeinsam von FAU Erlangen-Nürnberg / Fraunhofer IIS / AI / RIKEN-AIP), Georgia Tech in Atlanta (US), 06.03.2018 – 07.03.2018
- [8] 4. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop (organisiert gemeinsam von Energie Campus Nürnberg / FAU Erlangen-Nürnberg / DIW Berlin / ifo Institut / TU Berlin / TU München), DIW Berlin, 22.02.2018 – 23.02.2018
- [9] 3. Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, Energie Campus Nürnberg, 26.01.2018

7 Gutachten

- [G1] **Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung.** Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017 der Monopolkommission. Grimm V., G. Zöttl, C. Sölch (2017).
- [G2] **Stellungnahme und öffentliche Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energie- und des Stromsteuergesetzes** (Drsn. 18/11493, 18/11927) sowie zu einem von der Fraktion DIE LINKE. gesondert eingebrachten Änderungsantrag. Finanzausschuss des Deutschen Bundestages. Ismer R. (2017).
- [G3] **Dezentralität und zellulare Optimierung - Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf.** Gutachten im Auftrag der N-ERGIE AG. Grimm V., G. Zöttl, M. Ambrosius, B. Rückel, C. Sölch; gemeinsam mit der Prognos AG (2016).
- [G4] **Regionale Preiskomponenten im Strommarkt.** Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 71. Sondergutachtens Energie2015 der Monopolkommission. V. Grimm, G. Zöttl, B. Rückel und C. Sölch (2015).
- [G5] **Stärkung von Investitionen in Deutschland.** Bericht der Expertenkommission im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Energie, Berlin (2015). Kommission: Fratzscher, M. (Vorsitz), S. Articus, F. Bsirske, R. Feiger, L. P. Feld, J. Fitschen, V. Grimm, R. Hoffmann, H. Jung, M. Kerber, W. Lemb, F.-J. Lersch-Mense, H.-H. Loewenstein, T. Mayer, T. Oletzky, S. Russwurm, M. Schnitzer, U. Schröder, H. Schwager, E. Schweitzer, M. Vassiliadis, T. R. Böger, F. Nauschnigg, T. Posselt, A. Bender, W. Eckart, S. Eide, D. Homann, A. Lieber, L. Schuknecht, B. Alm, R. L. Hoest, M. Meurers, U. Neuhäuser, P. Steinberg, S. Weins, J. Zettelmeyer, M. Gornig, C. Michelsen, B. Pagel, and A. Schiersch.

8 Veröffentlichungen

- [1] Grimm V.; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2016). Transmission and generation investment in electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. *European Journal of Operational Research*, Bd. 254, S. 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.044>
- [2] Runge P.; C. Sölch; J. Albert; P. Wasserscheid; G. Zöttl; V. Grimm (2019). Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. *Applied Energy*, Bd. 233–234, S. 1078–1093. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.023>
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] Grimm V.; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2017). Optimal price zones of electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches. *Optimization Methods and Software*, S. 1–31. <https://doi.org/10.1080/10556788.2017.1401069>
- [6] Ambrosius M.; V. Grimm; C. Sölch; G. Zöttl (2018). Investment incentives for flexible demand options under different market designs. *Energy Policy*, Bd. 118, S. 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.059>
- [7] Grimm V.; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2018). A multilevel model of the European entry-exit gas market. *Mathematical Methods of Operations Research*. S. 1–33. <https://doi.org/10.1007/s00186-018-0647-z>
- [8] Aßmann D.; F. Liers; M. Stingl (2018). Decomposable Robust Two-Stage Optimization: An Application to Gas Network Operations Under Uncertainty. *Networks*. <https://doi.org/10.1002/net.21871>
- [9] Aßmann D.; F. Liers; M. Stingl; J.C. Vera (2018). Deciding Robust Feasibility and Infeasibility Using a Set Containment Approach: An Application to Stationary Passive Gas Network Operations. *SIAM Journal on Optimization*, Bd. 28, S. 2489–2517. <https://doi.org/10.1137/17M112470X>
- [10] 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>
- [11] Grimm V.; J. Grübel; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2019). Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. *European Journal of Operational Research*, Bd. 273, S. 1097–1108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.016>
- [12] Groß M.; M.E. Pfetsch; L. Schewe; M. Skutella (2018). Algorithmic results for potential-based flows: Easy and hard cases. *Networks*. <https://doi.org/10.1002/net.21865>
- [13] Gugat M.; G. Leugering; A. Martin; M. Schmidt; M. Sirvent; D. Wintergerst (2018). MIP-based instantaneous control of mixed-integer PDE-constrained gas transport problems. *Computational Optimization and Applications*, Bd. 70, S. 267–294. <https://doi.org/10.1007/s10589-017-9970-1>
- [14] Gugat M.; G. Leugering; A. Martin; M. Schmidt; M. Sirvent; D. Wintergerst (2018). Towards simulation based mixed-integer optimization with differential equations. *Networks*, Bd. 72, S. 60–83. <https://doi.org/10.1002/net.21812>
- [15] 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>
- [16] Mehrmann V.; M. Schmidt; J.J. Stolwijk (2018). Model and Discretization Error Adaptivity Within Stationary Gas Transport Optimization. *Vietnam Journal of Mathematics*, Bd. 46, S. 779–801. <https://doi.org/10.1007/s10013-018-0303-1>
- [17] Schewe L.; M. Schmidt (2018). Computing feasible points for binary MINLPs with MPECs. *Mathematical Programming Computation*. <https://doi.org/10.1007/s12532-018-0141-x>
- [18] Schmidt M.; M. Sirvent; W. Wollner (2018). A decomposition method for MINLPs with Lipschitz continuous nonlinearities. *Mathematical Programming*. <https://doi.org/10.1007/s10107-018-1309-x>

- [19] 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, Nr. 13, S. 51–59.
- [20] 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>
- [21] Bohlayer M.; M. Fleschutz; M. Braun; G. Zöttl (2018). Demand Side Management and the Participation in Consecutive Energy Markets - A Multistage Stochastic Optimization Approach. 15th International Conference on the European Energy Market, IEEE, Lodz, S. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEM.2018.8469912>

Preprints und eingereichte Arbeiten:

- [22] Robinius M.; L. Schewe; M. Schmidt; D. Stolten; J. Thürauf; L. Welder (2018). Robust Optimal Discrete Arc Sizing for Tree-Shaped Potential Networks. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/02/6447.html
- [23] Kramer A.; V. Krebs; M. Schmidt (2018). Strictly and Γ -Robust Counterparts of Electricity Market Models: Perfect Competition and Nash–Cournot Equilibria. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/07/6709.html
- [24] Kleinert T.; M. Schmidt (2018). Global Optimization of Multilevel Electricity Market Models Including Network Design and Graph Partitioning. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/02/6460.html
- [25] Ambrosius M., V. Grimm; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2018). Endogenous Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multilevel Optimization With Graph Partitioning. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3271827>
- [26] Grimm V., A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2018). Market-Based Redispatch May Result in Inefficient Dispatch. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3120403>
- [27] Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2019). Regionally differentiated network fees to provide proper incentives for generation investment. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3120476>
- [28] Labbé M.; F. Plein; M. Schmidt (2018). Bookings in the European Gas Market: Characterisation of Feasibility and Computational Complexity Results. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/12/6977.html
- [29] Schewe L.; M. Schmidt; J. Thürauf (2018). Structural Properties of Feasible Bookings in the European Entry-Exit Gas Market System. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2018/09/6831.html
- [30] Kretschmer S.; V. Grimm; 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>

9 Vorträge und Poster

- [1] Schmidt M. Mixed-Integer Optimization for Energy Systems. 661. WE-Heraeus-Seminar "Nonlinear Dynamics, Optimization and Control of Distributed Energy Systems", Bad Honnef, 29.01.2018
- [2] Liers F. Robust Treatment of Non-Convex Optimization Problems and an Application to Gas Networks. Designing and Implementing Algorithms for Mixed Integer Nonlinear Optimization, Schloss Dagstuhl, 19.02.2018
- [3] Grübel J. Natural gas in Germany: Perspectives on market design and network infrastructure. Bavarian Berlin Energy Research Workshop (BB2), Berlin, 22.02.2018
- [4] Sölch C. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Bavarian Berlin Energy Research (BB²), Berlin, 22.02.2018
- [5] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Berlin, 23.02.2018
- [6] Kretschmer S. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Berlin, 23.02.2018
- [7] Grimm V. Zum optimalen Zubau von Netzkapazität und Erneuerbaren Energien im liberalisierten Strommarkt. 82. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Erlangen, 06.03.2018

- [8] Haußner M. Long-term and short-term policy options for carbon pricing. Policy packages for low-carbon road maps in the materials sector, Berlin, 16.03.2018
- [9] Schmidt M. Mathematische Optimierung im Energiebereich. Eingeladener Vortrag bei der sonnen GmbH, Wildpoldsried, 20.03.2018
- [10] Kretschmer S. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Evidence-Based Economics Machine Learning Workshop, München, 22.03.2018
- [11] Liers F. Robust Treatment of Non-Convex Optimization Problems. 7th International Conference on High-Performance Scientific Computing, Hanoi, 22.03.2018
- [12] Schmidt M. Network Expansion, Price Zones, and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization to the German Electricity Market. Eingeladener Vortrag bei Siemens zum Thema "Mathematical Algorithms for Comprehensive Energy Management Systems", Erlangen, 05.04.2018
- [13] Egerer J. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. ENERDAY Conference, Dresden, 26.04.2018
- [14] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Enerday 2018, Dresden, 27.04.2018
- [15] Runge P. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. ENERDAY 2018, Dresden, 27.04.2018
- [16] Schmidt M. Mathematik - Wozu? Über Graphentheorie und Google. Schülervortrag am Dürer-Gymnasium Nürnberg, Nürnberg, 02.05.2018
- [17] Kretschmer S. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. ENERGY 2018, Mannheim, 15.05.2018
- [18] Grimm V. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ÖGOR Workshop Wien, Wien, 17.05.2018
- [19] Schmidt M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. 13. ÖGOR-IHS Workshop & ÖGOR Arbeitskreis Mathematische Ökonomie und Optimierung in der Energiewirtschaft 2018, Wien, 17.05.2018
- [20] Ismer R. Inclusion of Consumption into the EU Emissions Trading Scheme rather than Border (Tax) Adjustments: Economic and Legal Aspects. CBT Research Seminar, Oxford, 11.06.2018
- [21] Egerer J. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. 41st IAEE International Conference, Groningen, 12.06.2018
- [22] Grimm V. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 12.06.2018
- [23] Grübel J. Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. IWF-Doktorandenseminar, Nürnberg, 12.06.2018
- [24] Rückel B. Regionally differentiated network fees to provide proper incentives for generation investment. 41st IAEE International Conference, Groningen, 12.06.2018
- [25] Runge P. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. 41st IAEE International Conference, Groningen, 13.06.2018
- [26] Sölch C. Possible Regulatory Frameworks for Enabling Multiple Use of Storage Devices by Regulated and Private Market Participants in Smart Grids. 41st IAEE International Conference, Groningen, 13.06.2018
- [27] Kleinert T. A Global Solution Approach for MIQP-QP Bilevel Problems. IWOBIIP 2, Lille, 20.06.2018
- [28] Schmidt M. Combining Network Design and Graph Partitioning in a Multilevel Framework for Electricity Markets. IWOBIIP'18. 2nd International Workshop on Bilevel Programming, Lille, 22.06.2018
- [29] Thürauf J. Robust Optimal Discrete Arc Sizing for Tree-Shaped Potential Networks. ISMP 2018, Bordeaux, 02.07.2018
- [30] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ISMP 2018, Bordeaux, 03.07.2018
- [31] Runge P. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Master and Doctoral Seminar, Nürnberg, 03.07.2018

- [32] Kleinert T. Combining Network Design and Graph Partitioning in a Multilevel Framework for Electricity Markets. ISMP 2018, Bordeaux, 04.07.2018
- [33] Schmidt M. The Impact of Physics on Market Equilibria in Energy Networks. ISMP 2018. 23rd International Symposium on Mathematical Programming, Bordeaux, 04.07.2018
- [34] Grübel J. Nonconvex equilibrium models for gas market analysis: Failure of standard techniques and alternative modeling approaches. ISMP 2018, Bordeaux, 05.07.2018
- [35] Orlinskaya G. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. ISMP 2018, Bordeaux, 05.07.2018
- [36] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. EURO 2018, Valencia, 11.07.2018
- [37] Grübel J. Computational analysis of market designs for smart grid implementation. EURO 2018, Valencia, 11.07.2018
- [38] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. iSEnEC Conference, Nürnberg, 17.07.2018
- [39] Grimm V. Regional Differentiation of Renewable Energy Subsidies: A Long Term Assessment. iSEnEC Conference, Nürnberg, 17.07.2018
- [40] Kleinert T. Mathematical Optimization for Energy Market Design - Challenges and Solution Approaches. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [41] Krebs V. Uniqueness and multiplicity of market equilibria on DC power flow networks. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [42] Kretschmer S. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. iSEnEC 2018, Nürnberg, 17.07.2018
- [43] Grübel J. Modeling inefficiencies in booking-based gas markets. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [44] Orlinskaya G. Bilevel Optimization for Flexible Electricity Supply Tariff Design. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [45] Rückel B. Simultaneous storage and transmission expansion planning in smart grids. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [46] Runge P. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [47] Sölch C. Possible Regulatory Frameworks for Enabling Multiple Use of Storage Devices by Regulated and Private Market Participants in Smart Grids. iSEnEC Conference, Nürnberg, 18.07.2018
- [48] Thürauf J. Robust Optimization with Application in Utility Network Design. iSEnEC 2018, Nürnberg, 18.07.2018
- [49] Kretschmer S. Diffusion of green innovations: Evidence from a field study on domestic energy storage. Evidence-Based Economics Research Strategy Seminar, München, 23.07.2018
- [50] Grimm V. Energiemarktdesign am EnCN. Besuch von Katja Hessel am EnCN, Nürnberg, 02.10.2018
- [51] Schmidt M. A Multilevel Model of the European Entry-Exit Gas Market. 2nd Conference on Mathematics of Gas Transport, Berlin, 10.10.2018
- [52] Thürauf J. Robust Optimal Discrete Arc Sizing for Tree-Shaped Potential Network. MOG2, Berlin, 10.10.2018
- [53] Egerer J. Research for the next stage of the low-carbon energy transformation. Berlin Conference on Sustainable Energy and Infrastructure Economics and Policy (BELEC), Berlin, 12.10.2018
- [54] Grimm V. Panel: Regulating Infrastructure Markets. MaCCI Konferenz, Mannheim, 16.11.2018
- [55] Ismer R. Neues aus der Rechtsprechung - Diskussion. 9. Deutscher Energiesteuertag, Berlin, 23.11.2018
- [56] Runge P. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Aktionstage Nachhaltigkeit 2018, Nürnberg, 26.11.2018
- [57] Ismer R. Die Europäische Union und der deutsche Strompreis. Faszination Energie: EnCN, Nürnberg, 28.11.2018
- [58] Grimm V. Podiumsdiskussion – Wie können Innovationen im Energiebereich gefördert werden? dena SET Lab Dialogveranstaltung am BMWI, Berlin, 10.12.2018
- [59] Grimm V. Wie viel Dezentralität braucht die Energiewende? EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 13.12.2018

- [60] Kretschmer S. Influence of organisational setups on the perception of pilot projects. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [61] Runge P. Synthetische Kraftstoffe aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energien als Beitrag zur deutschen Energiewende. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [62] Sölch C. Regional differenzierte Investitionsanreize für Erneuerbare Energien. EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 13.12.2018

10 Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten

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

- [1] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [2] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2018
- [3] Vorlesung Unternehmenssteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [4] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [5] Vorlesung Internationales Steuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2018
- [6] Vorlesung Optimierung von Versorgungsnetzen. PD Dr. Lars Schewe / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2017
- [7] Seminar Energieoptimale Steuerung von Zugfahrten in einem U-Bahnnetz. Prof. Dr. Frauke Liers / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2018.
- [8] Vorlesung Lineare Komplementaritätsprobleme. Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2018.
- [9] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [10] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [11] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2018
- [12] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2018/2019
- [13] Vorlesung Advanced Game Theory. Prof. Dr. Veronika Grimm / Dr. Lawrence Choo. Wintersemester 2018/2019.
- [14] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2018/2019
- [15] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [16] Vorlesung Abgabenordnung. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [17] Vorlesung Umsatzsteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [18] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2018/2019
- [19] Vorlesung Advanced Mathematics for Economists. Prof. Dr. Alexander Martin. Wintersemester 2018/2019
- [20] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2018/2019
- [21] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2018/2019

Betreute Bachelorarbeiten:

- [1] Kernkraft in Frankreich: Renaissance oder schleichender Ausstieg durch Erneuerbare. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Synthetisches Methan als Automobilkraftstoff der Zukunft. Ein wirtschaftlicher Vergleich zu flüssigen Alternativen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Soziale Interaktionseffekte in der Verbreitung neuer Technologien im Energiebereich. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [4] Auswirkungen von Elektromobilität auf die Verteilernetzinfrastruktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [5] Indiens Stromsektor im Wandel von Kohleverstromung zu PV und Wind. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [6] Entwicklung und Perspektiven der EEG Umlage. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [7] Marktmacht im Strommarkt – Überblick und Bewertung für Deutschland. Prof. Dr. Veronika Grimm

- [8] A Heuristic for Linear Bilevel Problems based on Penalty Alternating Direction Methods. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [9] Eindeutigkeit von Nash-Cournot-Gleichgewichten auf Netzwerken. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [10] Negative Strombörsenpreise und der Einfluss der Erneuerbaren Energien. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Diskussion eines wissenschaftlichen Fachartikels zu „Regulierung von Energiemärkten“. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [12] Wie viel Speicher braucht die Deutsche Energiewende? Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [13] Vergleich der Ökobilanzen von wasserstoff- und batterieelektrischer Mobilität anhand einer Lebenszyklusanalyse. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [14] Vergleich verschiedener E-Fuels in einem Szenario für 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [15] Prosumage von Privathaushalten mittels Photovoltaikanlagen mit Batteriespeichern. Prof. Dr. Gregor Zöttl

Betreute Masterarbeiten:

- [1] Transformation of the German electricity system in a European context. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Analyse der Kosten batterieelektrischer Mobilität mit Fokus auf die Verteilnetzinfrastuktur. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Bidding Zones for the European Electricity Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [4] Graphpartitionierungen für Alternating Direction Methods mit Anwendungen auf Gasnetze. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [5] Bilevelproblem des europäischen Gasmarktes. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [6] Mixed integer moving horizon control for flexible energy storage systems. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [7] Ein Moving-Horizon-Ansatz für mehrstufige stochastische Portfolio-Optimierung mit langfristigen und illiquiden Infrastrukturinvestitionen. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [8] Robustifizierungen von Gleichgewichtsproblemen im Strommarkt. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [9] Eine Vorstellung und ökonomische Bewertung der neuen Regelungen des EEG. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Sustainable strategies and multilateral cooperation for the energy systems in Central Asia. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Flexibilisierung für das zukünftige Strommarktdesign – Eine mehrstufige Optimierung zur Analyse der Investitionsanreize und Wechselwirkungen von Flexibilitätsoptionen. 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.tinyurl.com/h6r3su6

EE-Technologien im urbanen Umfeld - EET

Projektbericht 2018

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



Gedruckte PV auf Glas

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 2018 wurden alle drei Arbeitspakete, wie im Folgenden näher erläutert, vorangetrieben.

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	

Ein großer Vorteil der gedruckten Elektronik ist die Möglichkeit, Bauelemente wie organische Solarzellen oder organische Leuchtdioden auf nahezu beliebige Substrate aufzubringen. Wünschenswert ist dabei die direkte Strukturierung der Bauelemente während des Druckvorgangs. Um die 2D strukturierte Funktionalisierung von Oberflächen mit organischer (Opto-)Elektronik, bspw. organischer Photovoltaik, zu ermöglichen, wurde das sog. „Pinning Center“-Verfahren entwickelt (Abbildung 1). Bei diesem Verfahren werden isolierte Tropfen einer funktionalen Tinte, z.B. PEDOT:PSS, mittels Tintenstahldruck in einem 2D Muster auf die zu beschichtende Oberfläche aufgebracht. In Abbildung 1 wurde bspw. das ZAE-Logo als Muster gewählt. Nach dem Trocknen dieser Tropfen wird dieselbe Tinte als homogener Flüssigfilm, z.B. mittels Rakeln, aufgebracht. Da sich bei gedruckten optoelektronischen Bauteilen hydrophile und hydrophobe Schichten abwechseln, entnetzt die wässrige PEDOT:PSS-Lösung von der hydrophoben Oberfläche der aktiven Schicht der Solarzelle überall dort, wo sich keine „pinning center“ befinden. Umgekehrt bildet sich ein homogener Film der funktionalen Tinte überall dort, wo die „pinning center“ dicht genug stehen. Die dazu notwendige minimale „pinning center“-Dichte lässt sich aus der Oberflächenspannung der Tinte, der Oberflächenenergie des Substrats und der Nassfilmdicke berechnen. Mit Hilfe dieser Technik lassen sich (opto-)elektronische Bauteile auch auf ansonsten schwer benetzbare Oberflächen drucken und dabei mit einer Auflösung von ca. 100 µm strukturieren.

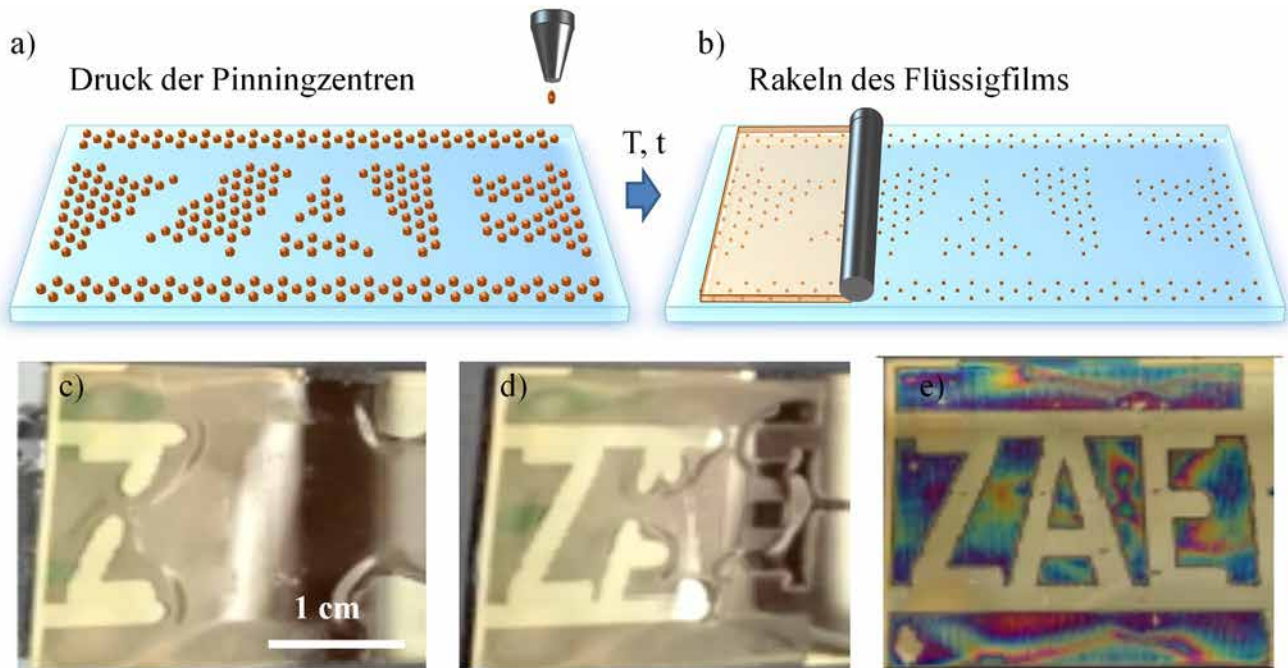


Abbildung 1: „Pinning Center“-Verfahren für die strukturierte Funktionalisierung von Oberflächen mit (opto-)elektronischen Bauelementen. a) Schematische Darstellung der Abscheidung der „pinning center“ in Form des ZAE-Logos mittels Tintenstrahldruck. b) Aufrakeln eines homogenen Flüssigfilms der PEDOT:PSS-Tinte. c) – e): Fotoserie der Entnetzung des zunächst homogenen Flüssigfilms an den nicht von „pinning centers“ bedeckten Stellen in 10 s-Intervallen.

Besonders in der Automobil-, Medizin- und Energietechnik sowie der Konsum- und Industrieelektronik wird die Kombination aus organischer Elektronik und 3D-Oberflächen in naher Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen. So ist beispielsweise der Einsatz von großflächig gedruckten OLEDs auf gekrümmten Oberflächen zur Be- und Ausleuchtung von Fahrzeuginnenräumen oder als Heckleuchte denkbar. Gedruckte OPV kann als Lichtsensor oder auch für das Energy-Harvesting bei autarken Systemen genutzt werden. In dem im Jahr 2018 begonnenen Forschungsprojekt OLE-3D bündeln das ZAE Bayern und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der FAU ihre Kompetenzen, um die Grenzen der konventionellen planaren Elektronik zu überwinden. Durch die Kombination von digitalen Druckmethoden auf 3D-Oberflächen, SMT-Bauteilen („Surface mounted technology“) und organischen Funktionsstrukturen werden hochleistungsfähige Hybridbauteile hergestellt. Im Jahr 2018 wurden geeignete Tintenformulierungen getestet und in Zusammenarbeit mit der Neotech AMT GmbH wurde mit dem Aufbau des 5-achsigen CNC-Systems mit integrierter Tintenstrahldruckeinheit begonnen (Abbildung 2). Für das Jahr 2019 werden erste Ergebnisse erwartet.

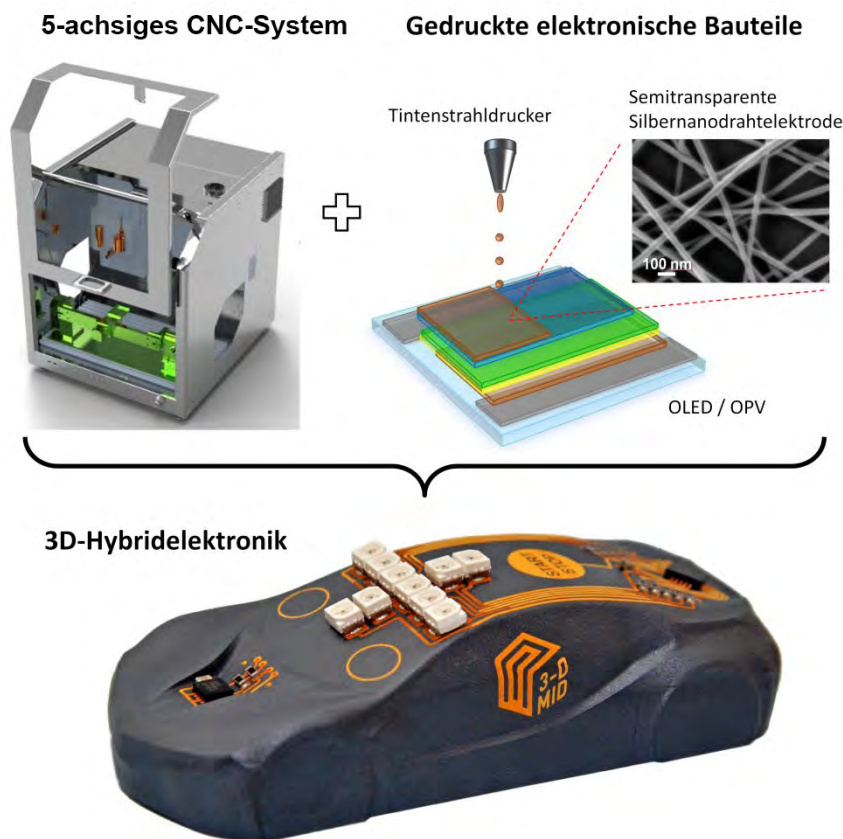


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Herstellung hochintegrierter 3D-Hybridelektronikbauteile (Bildquelle: FAPS) durch Kombination eines 5-Achsiges-CNC-Systems (Bildquelle: Neotech AMT) und gedruckter organischer Elektronik (Bildquelle: ZAE Bayern)

Die Arbeiten an der in-line Qualitätskontrolle (QC) für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung gedruckter Solarmodule wurden 2018 fortgesetzt. Wir sind dabei unserem Ziel, jede einzelne Schicht der Solarzellen während des Herstellungsprozesses zu kontrollieren, wieder ein Stück nähergekommen. Inzwischen kann der Flächenwiderstand der Elektroden (mittels Wirbelstromsensor), die Schichtdicke der aktiven Schicht (mittels UV/Vis-Spektrometer) sowie das Auftreten von Beschichtungsdefekten in der aktiven Schicht (durch Kameras) in-line bestimmt werden. Im Teilprojekt 2, „Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse“, ist bereits die nächste Stufe des Ausbaus durch Einbau einer Anlage zur bildgebenden Photo- und ggf. Elektrolumineszenz in Vorbereitung (s. Bericht TP2).

Kostenübersicht

Die Personal- und Sachmittel wurden vollständig ausgeschöpft. Nicht verwendete Investitionsmittel werden in 2019 u.a. für die Installation von in-line-QC-Geräten und für Ausrüstung für den Druck organischer PV auf 3D Oberflächen verwendet.

Ausblick

Nächste Schritte: Die monolithische Verschaltung von Solarzellen zu Modulen mittels Rolle-zu-Rolle-Laserstrukturierung wird weiterentwickelt. Durch die Umstellung von Femto- auf Nanosekunden-Pulse werden die Anlagenkosten um eine Größenordnung reduziert. Im Rahmen des AiF-Projekts OLE3D wird die Anlage zum Druck von OPV-Modulen auf 3D Oberflächen fertiggestellt und es werden Demonstratoren hergestellt. In Kooperation mit dem TP2 werden die entwickelten Verfahren für die in-line Qualitätskontrolle in die Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage implementiert.

2 Zerstörungsfreie und Bildgebende Analyse

2.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Dr. Thomas Heumüller (FAU)

2.2 Arbeiten und Ergebnisse

2.2.1 In-Line Qualitätskontrolle

Im Rahmen des EET Projekts werden völlig neue Beschichtungsverfahren entwickelt, mit denen Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld umgesetzt werden. Nachdem mit hochaufgelöster Photolumineszenz (PL) eine erfolgreiche Qualitätskontrolle umgesetzt wurde, konnten im vergangenen Jahr zusätzlich Elektrolumineszenz (EL) Messungen an semi-transparenten Modulen aus TP4 durchgeführt werden, siehe Abb. 3, links. Die PL- sowie EL-Bilder zeigen komplementäre Informationen, welche eine Unterscheidung von Defekten durch Entmischung oder Beschichtungsinhomogenitäten einerseits und von Kontaktproblemen andererseits ermöglicht. Die Spektrale Verteilung der PL liefert weitere wichtige Informationen, um Einblicke in die mikroskopische Morphologie der Solarzellen zu erhalten. So kann zum Beispiel durch die Ausbildung zusätzlicher Schultern im PL-Spektrum zwischen mehr und weniger kristallinen Schichten unterschieden werden. Auch eine Beurteilung, ob Restbereiche reiner Donor- oder Akzeptorphasen vorhanden sind, die nicht vollständig durchmischt sind, kann mittels spektraler PL erfolgen. Um solch eine präzise Analyse der mikro- und nano-Morphologie zu ermöglichen, wurde eine Hyperspektralkamera in Betrieb genommen, siehe Abbildung 3, rechts. Die Spezialentwicklung der Firma Photon aus Kanada erlaubt bei höchster Auflösung für jeden Pixel Spektren im Bereich von 400-100nm aufzunehmen. Im weiteren Projektverlauf wird effektive und umfassende Qualitätskontrolle mittels dieser innovativen Methodiken die Entwicklung neuer Druckverfahren im Teilprojekt TP1 weiter unterstützen und beschleunigen.

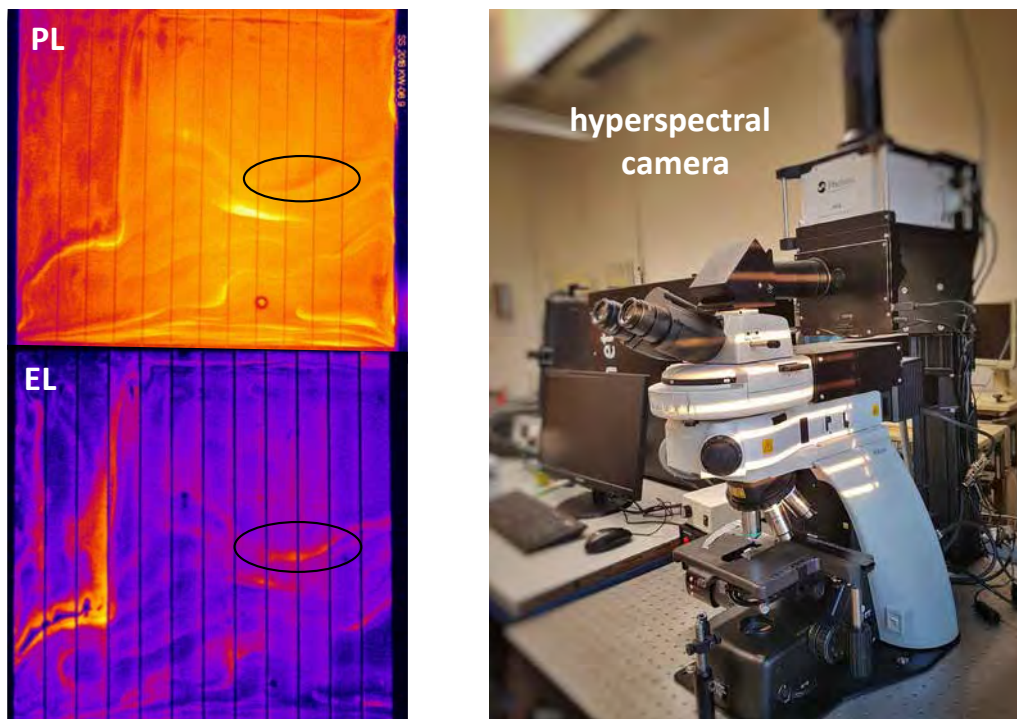


Abbildung 3: Links: Photolumineszenz (PL) und Elektrolumineszenz (EL) Bilder eines transparenten OPV Moduls aus TP4 zeigen trocknungsbedingte Phasenseparation in PL und Interface Effekte sowie Serienwiderstand in EL. Rechts: die neue Hyperspektral-Kamera wird mit wellenlängenaufgelösten PL- und EL-Bildern die analytischen Möglichkeiten umfassend erweitern.

2.2.2 Stabilitätsuntersuchungen an gedruckten Solarzellen

Neben der Qualitätskontrolle und detaillierten Analyse von Schichten in neuartigen Druckprozessen rückt eine Untersuchung der Stabilität dieser Schichten unter verschiedenen Stressoren zunehmend in den Mittelpunkt. Insbesondere für die erfolgreiche Implementierung einer Fassade mit semitransparenten Solarzellen in TP4 ist eine Gewährleistung der Stabilität von höchster Bedeutung. Neben dem schnellen Screening verschiedener Bauteilarchitekturen auf ihre Stabilität gegen externe Einflussfaktoren wie Sauerstoff, Wasser als auch UV-Strahlung, können bildgebende Verfahren insbesondere auch den zeitlichen Verlauf von Bauteileigenschaften untersuchen und damit wertvolle Informationen über die vorherrschenden Degradationsmechanismen geben. Das bestehende PL Setup wurde durch die Eigenentwicklung zusätzlicher Steuerungskomponenten voll automatisiert, sodass eine parallelisierte Zeitserie von EL und PL Bildern, sowie Strom-Spannungs-Kennlinien (IV) mehrerer Solarzellen gleichzeitig möglich ist, siehe Abbildung 4. Hierbei werden zunächst alle Zellen im Test mit Strom beaufschlagt und EL-Bilder aufgenommen. Anschließend erfolgt softwaregesteuert die Aktivierung einer UV-LED, welche die Aufnahme eines PL Bildes aller Zellen ermöglicht, bevor mittels einer Weißlicht-LED die IV-Kennlinien aufgenommen werden und die Zelle für einen bestimmten Zeitraum mit konzentriertem Weißlicht von bis zu 5 Sonnen beleuchtet werden kann. Eine Erhöhung der Beleuchtungsintensität in diesen Stabilitätsanalysen erlaubt es längere Betriebsdauern in überschaubarer Zeit zu simulieren. Zusätzlich können durch Kontrolle des Gasstroms in der Messkammer verschiedenste Atmosphären eingestellt und deren Einfluss auf das Bauteil getestet werden. In Abbildung 4 ist die Ausbildung von Punktdefekten verursacht durch Sauerstoff, der an Störstellen durch die Metallelektrode diffundieren kann, in EL-Messungen sichtbar. Durch die Sensitivität von EL-Messungen auf die Qualität der Elektroden sowie der Loch- und Elektronen-leitenden Schichten, können in enger Zusammenarbeit mit TP4 optimale Schichtkombinationen gesucht werden, um die Stabilität semitransparenter Module entscheidend zu verbessern. Die simultane Messung der Strom-Spannungs-Kennlinien ermöglicht eine Korrelation der optisch erfassten Defekte auf die Performanz des Bauteils und erlaubt somit eine Beurteilung, welche Defekte kritisch für den Betrieb sind. Über die Messungen von IV-Kennlinien hinaus ist auch die Analyse von Ladungsträgermobilitäten und -lebensdauern mittels transients in-Situ-Messungen möglich. Damit können weitere Informationen über die exakten Wirkmechanismen von Defekten auf die Bauteileigenschaften sowie Hinweise zur Entwicklung neuer Bauteilkonzepte gewonnen werden.

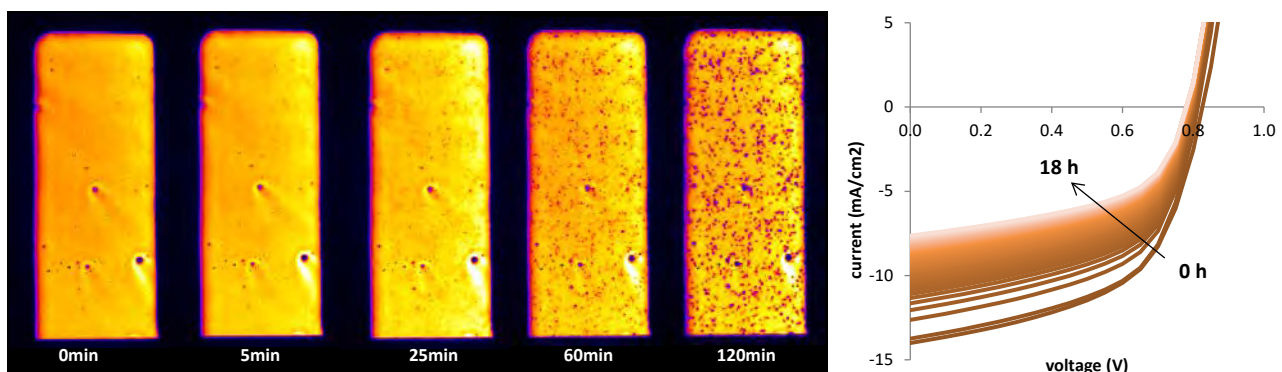


Abbildung 4: In-Situ Analyse organischer Solarzellen mit zeitaufgelösten EL Messungen (links) sowie Strom-Spannungs-Kennlinien (rechts)

2.3 Kostenübersicht

Die Projektmittel wurden durch Investitionen in die Hyperspektralkamera, sowie eine Lock-In Thermographie Kamera, die aktuell in Betrieb genommen wird, ausgeschöpft. Eine umfassende Qualitätskontrolle für Prozesse aus TP1 sowie Stabilitätskontrolle für Prototypen aus TP4 ist damit gewährleistet. Das Personal im Projekt ist zu 50% ein promovierter Mitarbeiter und zu 50% ein Doktorand. Ein Drittmittelprojekt zur beschleunigten Alterung von organischen Solarzellen mit Konzentriertem Licht von bis zu mehreren Hundert Sonnen vervollständigt die Stabilitätsuntersuchungen.

3 Smarte und schaltbare Fenster

3.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Wolfgang Heiss (FAU)

3.2 Arbeiten und Ergebnisse

Das Ziel dieses Projektes ist es, schaltbare Fenster zu entwickeln, die helfen den Energiebedarf von Tags über benutzten Gebäuden zu senken, vor allem über die Reduktion der Stromkosten für Klimatisierung und Beleuchtung der Räume. Die Strategie die dafür gewählt worden ist basiert auf in der Literatur demonstrierte Elektrochrome Effekte, die erlauben die Transparents von Fenstern im infraroten Spektralbereich und im Sichtbaren unabhängig voneinander elektrisch zu Schalten. Dazu wurden im ersten Projektjahr Nanoteilchen aus Indium-Zinn-Oxid synthetisiert, die die gewünschten optischen Eigenschaften im Infraroten als auch ausreichende elektrische Eigenschaften aufweisen, um daraus ein elektrochromes Bauteil zu entwickeln. Im laufenden Projektjahr wurden dazu aus den kolloidalen Nanokristallen Schichten hergestellt, die ähnliche plasmonische Eigenschaften aufweisen wie die Teilchen in der Lösung. Dabei hat sich gezeigt, dass es dazu notwendig ist, Tempertemperaturen zu wählen, bei denen die organischen Liganden nicht komplett entfernt werden, da ansonsten die plasmonischen Eigenschaften der Nanoteilchen verloren gehen. Als zweiter Parameter musste auch die Porösität des entstehenden Filmes eingestellt werden, so dass die Oberfläche der Nanoteilchen von einem festen Elektrolyten der auf die Elektroden aufgebracht wird, auch erreicht werden kann. In der Literatur werden die Indium-Zinn-Oxid Nanoteilchen dazu mit Polymerteilchen vermischt, die nach dem Abscheiden des Films durch Tempern verbrannt werden und dabei die Porösität im Film gewährleisten. Dieser Technologieschritt konnte von uns bisher nicht zufriedenstellen erreicht werden, ohne dabei die Ligandenhülle der Nanokristalle ausreichen zu erhalten, um Plasmonenresonanzen im gewünschten Spektralbereich zu erhalten. Deshalb wurde von uns letztlich eine Alternative Methode zur Herstellung poröser, nanopartikulärer Elektrodenschichten entwickelt. Bei dieser Methode werden wie in Abbildung 5 dargestellt ist, zunächst elektrochemisch Indium- und Zinn-Hydroxide abgeschieden, welche anschließend durch einen Temperschritte in das gewünschte nanopartikuläre und poröse Indiumdioxid umgewandelt werden. Durch Röntgenbeugung wurde dabei gezeigt, dass die gewünschte Zusammensetzung des ITO erhalten worden ist. Die auf diesem Weg erzeugten Schichten müssen im weiteren noch optimiert werden, um die gewünschte Transparenz zu gewährleisten und noch bestehende Haftungsprobleme zu lösen. Ansonsten stehen sie zur Weiterverwendung für die Entwicklung von elektrochromen Bauteilen zur Verfügung.

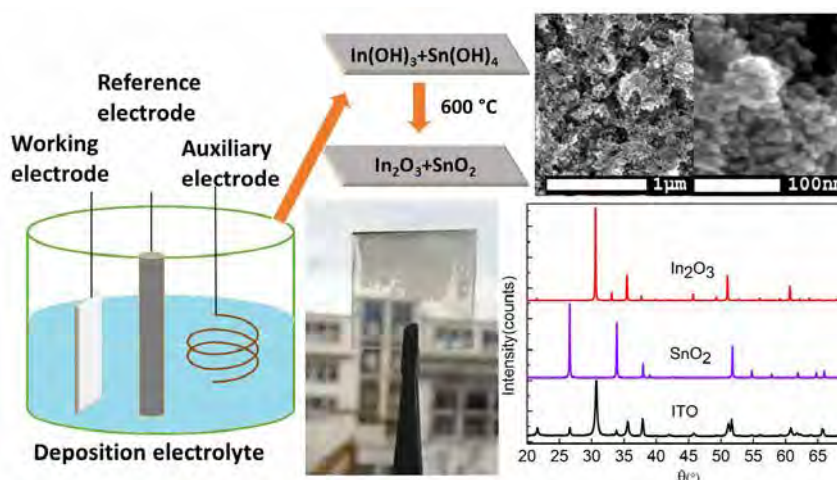


Abbildung 5: Verfahren zur Herstellung von porösen und nanopartikulären Indium-Zinn-Oxid Schichten als potentielle Elektroden für elektrochrome Fenster.

Der Aufbau eines elektrochromen Fensters in „Batteriebauweise“ erlaubt es, sowohl die Kathode als auch die Anode mit einer elektrochromen Funktion auszustatten. Während die eine Elektrode z. B. für den Infraroten Spektralbereich schaltbar gemacht werden kann, kann die zweite Elektrode für den komplementären Sichtbaren Spektralbereich genutzt werden. Die erste Wahl, um dies zu erreichen fiel auf Preußenblau als elektrochromes Material, das in der Literatur bereits gut beschrieben ist. Dazu gibt es auch eine Vielzahl von Elektrolyten, von denen wir einige getestet haben. Die Wahl eines geeigneten elektrolytischen Polymers, das ausreichend schnelle Schaltzeiten ermöglicht und dabei auch eine ausreichende Stabilität aufweist, ist für uns nach wie vor ein ungelöstes Problem. Die elektrochromen Testbauelemente, die auf elektrolytisch abgeschiedenem Preußisch-Blau basieren, zeigen zwar das gewünschte Schaltverhalten im sichtbaren Spektralbereich, aber auch noch erhebliche Probleme. Wie in Abbildung 6 gezeigt, resultieren die elektrochemische Reduktion und Oxidation im bekannten Umschalten von einem tiefen Blau, mit einer Transmission von weniger als 5% bei einer Wellenlänge von 750 nm, zu nahezu transparentem Verhalten.

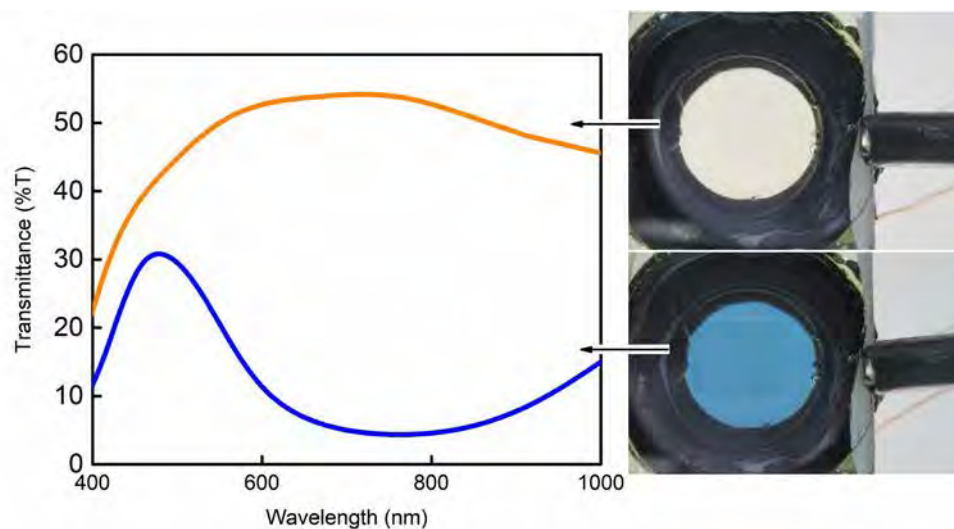


Abbildung 6: Schaltverhalten eines elektrochromen Bauteiles basierend auf Preußenblau

Eine Hauptaufgabe des kommenden Projektjahres wird sein, die elektrochromen Bauteile so zu erweitern, dass sie die gewünschten kombinierten Effekte sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Spektralbereich zeigen. Dabei steht nicht nur die Entwicklung der elektrochromen Elektroden im Fokus, sondern im speziellen auch der zu verwendende Festkörper-Elektrolyt. Sollten hier keine raschen Weiterentwicklungen gelingen, ist eine alternative Architektur des elektrochromen Fensters zu überlegen und zu testen.

3.3 Kostenübersicht

Anstatt der geplanten einen Stelle wurde 2018 mit zwei Dissertanten an dem Projekt gearbeitet, welche einen komplementären Hintergrund aufweisen. Es waren für dieses Jahr Investitionskosten für die Aufskalierung der Synthese geplant, aber nicht getätigt, zumal diese Aufskalierung der Materialien zum gegebenen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll erscheint. Hier müssen erst die richtigen Materialien identifiziert werden.

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 2018 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

Im Jahr 2018 wurden die Multikopf-Beschichtungsanlage und der Rolle-zu-Rolle-Laser weiter optimiert, so dass die Rolle-zu-Rolle-Fertigung organischer Solarmodule in der „Solarfabrik der Zukunft“ in vollem Umfang aufgenommen werden konnte. Damit stehen für Kooperationsprojekte jederzeit Solarmodule in ausreichendem Umfang zur Verfügung (Übergabepunkt Ü1M).

Durch geeignete Maßnahmen konnte der R2R-Laser (Abbildung 7) so in den Gesamtproduktionsprozess integriert werden, dass der Meilenstein M1M („Effizienzlücke zwischen Laborzelle und R2R-Modul auf <10% reduziert“) für organische Solarmodule erreicht werden konnte. Zu diesen Maßnahmen gehörten u.a. die Änderung des Beleuchtungswinkels des Kamerafeldes für die automatische Bilderkennung, die Installation eines Vakuumschisches für die Fixierung des Substrats während des Laservorgangs sowie die Optimierung des Transports des Substrats.

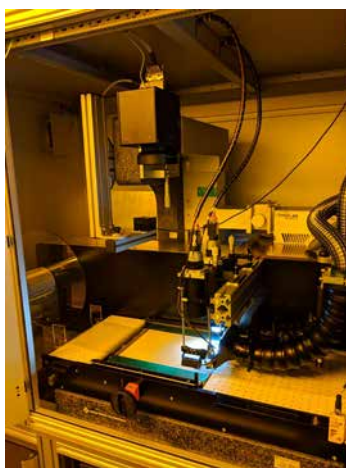


Abbildung 7: Rolle-zu-Rolle-Laser-Einheit mit Galvo-Kopf, Bildverarbeitungssystem, Vakuum-Transportbändern und Absaugungsvorrichtung.

Bei Perowskit-basierter Photovoltaik ist die Lücke zwischen kleinen Laborzellen ($0,1 \text{ cm}^2$) und Modulen von mehreren cm^2 Fläche aufgrund der komplexen Kristallisationskinetik der aktiven Schicht noch schwerer zu schließen als bei organischer Photovoltaik (OPV). Durch die Wahl geeigneter Materialien für die beiden Ladungsextraktionsschichten, die Optimierung der Abscheidung der Perowskitschicht sowie den Einsatz des modifizierten R2R-Lasers konnten 16 cm^2 -Module mit Effizienzen von über 12% hergestellt werden (Abbildung 8).

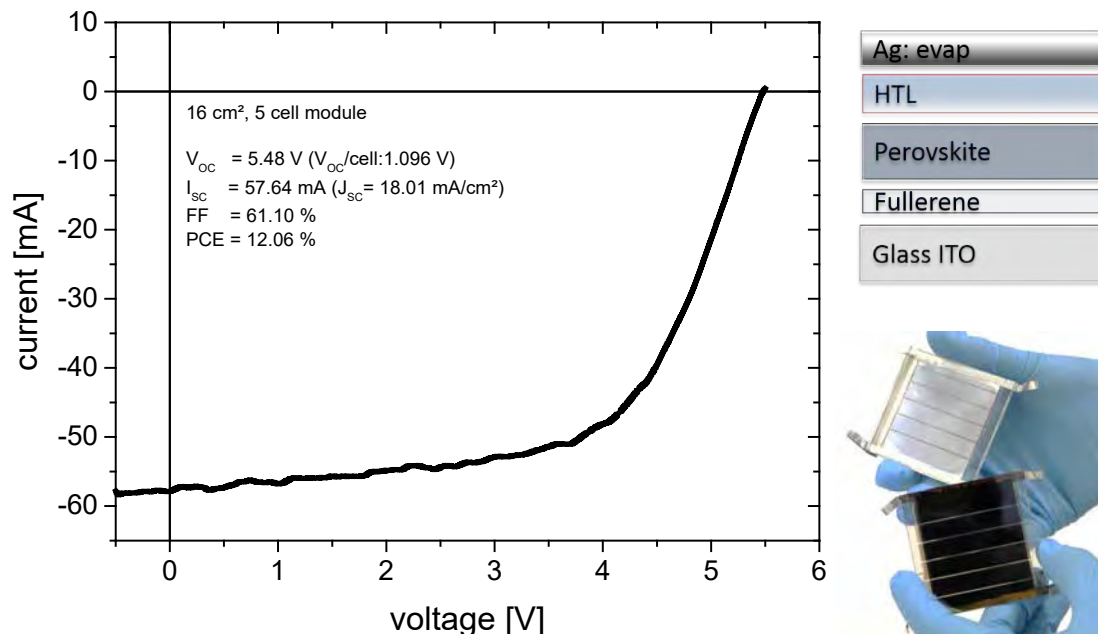


Abbildung 8: Strom-Spannungs-Kennlinie eines Perowskit-Moduls aus fünf Zellen (Aufbau und Fotos der Module rechts) von insgesamt 16 cm^2 Fläche.

Die Integration organischer Solarmodule in die urbane Stromversorgung wurde u.a. im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojekts „Fassade 3“ vorangetrieben. Das Ziel dieses Projekts ist die Installation multifunktionaler, mit organischer Photovoltaik (OPV) ausgestatteter Fassadenelemente in einem Wohngebäude und die Messung der resultierenden Gesamt-Energieflüsse. Um den Beitrag der OPV zum Energiehaushalt des Gebäudes abschätzen zu können, wurde mit der Messung der jährlichen Energieernte der Module und der sie bestimmenden Größen begonnen. Dazu wurden OPV-Module auf dem Dach des ZAE-Gebäudes in Erlangen installiert und an ein eigens für dieses Projekt konstruiertes Leistungsmessgerät angeschlossen. Dieses Messgerät bestimmt die Leistung im Arbeitspunkt der Strom-Spannungskennlinie und speichert sie über ein Web-Interface auf einem Server ab. Gleichzeitig werden Temperatur und Einstrahlung gemessen. Die Messungen haben 2018 begonnen und sollen über einen Zeitraum von einem Jahr laufen.

Hochwertige kommerzielle Barrierefolien sind teuer und müssen in einem zusätzlichen Prozessschritt auflaminiert werden. Wir haben deshalb eine lösungsbasierte Verkapselungsmethode entwickelt, die eine direkte Aufbringung der Barriere auf flexible Bauteile erlaubt. Die Methode beruht auf der Abscheidung einer Perhydropolysilazan (PHPS)-Tinte durch Rakeln auf organische Solarzellen und der nachfolgenden Umwandlung in dichte Siliziumoxid-Schichten mittels Vakuum-Ultraviolett (VUV)-Bestrahlung. Um die Flexibilität der Barrieren zu erhöhen, wurden vierlagige Schichten aus zwei jeweils 170 nm dicken PHPS-Schichten und zwei jeweils $5 - 10 \mu\text{m}$ dicken Polymerschichten abgeschieden (Abbildung 11). Als Polymere wurden UV-härtende Epoxy- und Acrylat-Harze verwendet, um eine gute Adhäsion zur PHPS-Schicht zu erzielen. Die resultierenden Barrierschichten weisen Wasserdampftransmissionsraten (WVTR) von $< 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ und Sauerstofftransmissionsraten (OTR) von $< 10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ auf. Nach 3000 Biegezyklen beträgt die Zunahme der WVTR weniger als 10% (Abbildung 11). Die Schutzwirkung der PHPS-basierten Barrierschichten wurde in beschleunigten Alterungstests von P3HT:PCBM-basierten Solarzellen ermittelt. Nach 350 Stunden in feuchter Hitze ($40^\circ\text{C}/85\% \text{ rel. F.}$) verringert sich die ursprüngliche Effizienz der Solarzelle um nur 12 % des Ausgangswerts von 3%.

Bestrahlung der verkapselten Bauteile in einem Sonnensimulator bei 65 °C resultiert in einer Abnahme der Effizienz von nur 29%, während unverkapselte Zellen innerhalb von 24 Stunden versagen. Die beschriebene Direktverkapselungsmethode ermöglicht somit die in-line-Verkapselung elektronischer Bauteile durch drucktechnische Verfahren, auch von 3D Objekten, was die Backend-Prozessierung gedruckter PV-Module revolutioniert.

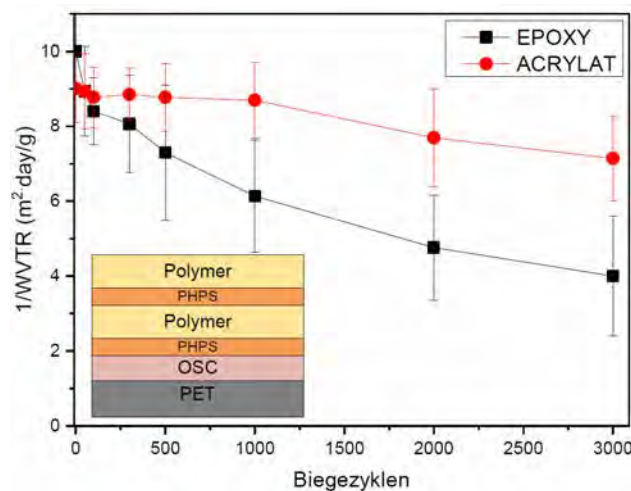


Abbildung 9: Barrierewirkung (als reziproke WVTR) von PHPS/Polymer-Multilagen (Multilagenarchitektur s. Einfügung) als Funktion der Anzahl der Biegezyklen (Biegeradius 3 cm).

Kooperationen

Gemeinsam mit Prof. Dentel und Prof. Kießling von der THN wurde das BMWi-Projekt „Fassade 3“ zur Errichtung einer multifunktionalen Demonstrationsfassade begonnen (s.o.). Weitere Partner in diesem Projekt sind Bavarian Optics, OPVIUS GmbH, die Hohenstein Institute für Textilforschung und ACX GmbH.

Kostenübersicht

Die Personal- und Sachmittel wurden vollständig ausgeschöpft. In 2018 nicht verausgabte Investitionsmittel werden in 2019 u.a. für die Fassadenintegration gedruckter PV-Module verwendet.

Ausblick

Nächste Schritte: besonderes Augenmerk wird weiterhin der Effizienzerhöhung der gedruckten Module gewidmet, einerseits durch weiteres Schließen der Effizienzlücke zwischen Laborzellen und R2R-Modul, andererseits durch die Etablierung von Druckprozessen für Materialien mit hohem Effizienzpotential, wie den Perowskiten. Im Rahmen des BMWi-Projekts Fassade3 werden gedruckte Solarmodule in modulare und multifunktionale Fassadenelemente integriert.

5 Schlussworte

Die Teilprojekte des Projekts EET haben ihre für 2018 vorgesehenen Ziele weitgehend erreicht. Die Kooperationen zwischen den Partnern des Projekts EET sowie mit anderen Gruppen des EnCN2 sind angelaufen. An dieser Stelle sei insbesondere das gemeinsam von den Arbeitsgruppen der THN und des ZAE durchgeführte, vom BMWi geförderte Industrie-Verbundprojekt „Fassade 3“ erwähnt. Mit „OLE3D“ wurde in 2018 ein weiteres Projekt unter Beteiligung lokaler Firmen begonnen.

Die für das Jahr 2018 bewilligten Personal- und Sachmittel wurden weitgehend verausgabt. Der Rückstand bei den Investitionsmitteln konnte zwar nicht vollständig aufgeholt werden, die entsprechenden Geräte sind aber bereits bestellt, bzw. werden im Laufe des Jahres 2019 beschafft.

Im Jahr 2019 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 bzw. Aufskalierung übergeben. Im Rahmen der Verbundprojekte „Fassade 3“ und „OLE3D“ sind für 2019 die Installation einer OPV-Demonstrationsfassade bzw. die Inbetriebnahme eines Robotik-Ink Jet-Systems für den Druck organischer Optoelektronik auf 3D Oberflächen geplant.

6 Vorträge & Poster 2018

- [1] F. Machui; H.-J. Egelhaaf; P. Kubis. Solar factory of the future - R2R printed Photovoltaic. Messe für organische und gedruckte Elektronik, 2018
- [2] H.-J. Egelhaaf. The Green New Future in Print – Solarfabrik 3.0. Innovationslabor Josephs in Nürnberg, 2018
- [3] H.-J. Egelhaaf. From Oligomers to Polymers OR From Photophysics to Devices OR From Tübingen to Nürnberg via Milano and Linz. International Symposium on Organic Photovoltaics - Spectroscopy and Degradation, 2018
- [4] H.-J. Egelhaaf. Wie weit ist die Perowskit-Photovoltaik noch vom Markt entfernt? Technologie-Plattform Photovoltaik, 2018
- [5] K. C. Tam. Shy Organic Photovoltaics—Visually Attractive Digitally Printed Solar Modules with Hidden Interconnects. MRS Spring Meeting & Exhibit, 2018
- [6] P. Maisch; T. Reitberger. Digitaldruck organischer Optoelektronik auf 3D-Körper [OLE-3D]. Mitgliederversammlung der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V., 2018
- [7] K. C. Tam. Shy Organic Photovoltaics—Visually Attractive Digitally Printed Solar Modules with Hidden Interconnects. 11th International Summit on Organic and Hybrid Photovoltaics Stability (ISOS 11) Conference, 2018
- [8] H.-J. Egelhaaf. Future PV. MIIT Schulung für chinesische Delegation, 2018
- [9] P. Maisch. Process Development for Inkjet Printing of Organic Photovoltaics. Energie Campus Nürnberg: EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2018
- [10] K. C. Tam. Shy Organic Photovoltaics—Visually Attractive Digitally Printed Solar Modules with Hidden Interconnects. Energie Campus Nürnberg: EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2018
- [11] I. A. Channa. Printed Oxygen and Water Barriers for the Protection of Organic Electronics. Energie Campus Nürnberg: EnCN Jahreskonferenz Highlights aus der aktuellen Forschung, 2018

7 Veröffentlichungen 2018

- [1] 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, 252-258, 2018
- [2] S. Englisch; J. Wirth; N. Schrenker; K. C. Tam; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec; E. Spiecker. Mechanical Failure of Transparent Flexible Silver Nanowire Networks for Solar Cells using 3D X-Ray Nano Tomography and Electron Microscopy. Microscopy and Microanalysis, 24, 558-559, 2018
- [3] S. Mashhoun; Y. Hou; H. Chen; F. Tajabadi; N. Taghavinia; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. Resolving a Critical Instability in Perovskite Solar Cells by Designing a Scalable and Printable Carbon Based Electrode-Interface Architecture. Advanced Energy Materials, 8, 1802085, 2018
- [4] A. Früh; H.-J. Egelhaaf; H. Hintz; D. Quinones; C.J. Brabec; H. Peisert; H.-J. Egelhaaf. PMMA as an effective protection layer against the oxidation of P3HT and MDMO-PPV by ozone. Journal of Materials Research, 33, 1891-1901, 2018
- [5] S. Strohm; F. Machui; P. Kubis; N. Gasparini; M. Salvador; I. McCulloch; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. P3HT: Non-Fullerene Acceptor based large area, semi-transparent PV modules with power conversion efficiencies of 5%, processed by industrially scalable methods. Energy & Environmental Science, 11, 2225-2234, 2018
- [6] P. Maisch; K.C. Tam; P. Schilinsky; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Shy Organic Photovoltaics: Digitally Printed Organic Solar Modules With Hidden Interconnects. Solar RRL, 1800005, 2018
- [7] P. Maisch. Digitaldruck organischer Optoelektronik auf 3D-Körper, OLE-3D. Fachzeitschrift PLUS, 9, 2018

8 Patente 2018

- [1] J. Hepp; A. Vetter; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. Bildgebendes Verfahren zur Flüssigkeitsdetektion (angemeldet)
- [2] A. Distler; H.-J. Egelhaaf; K. Pichler Organic Solar Modules and/or Fabrication Method (continuation in part, angemeldet)

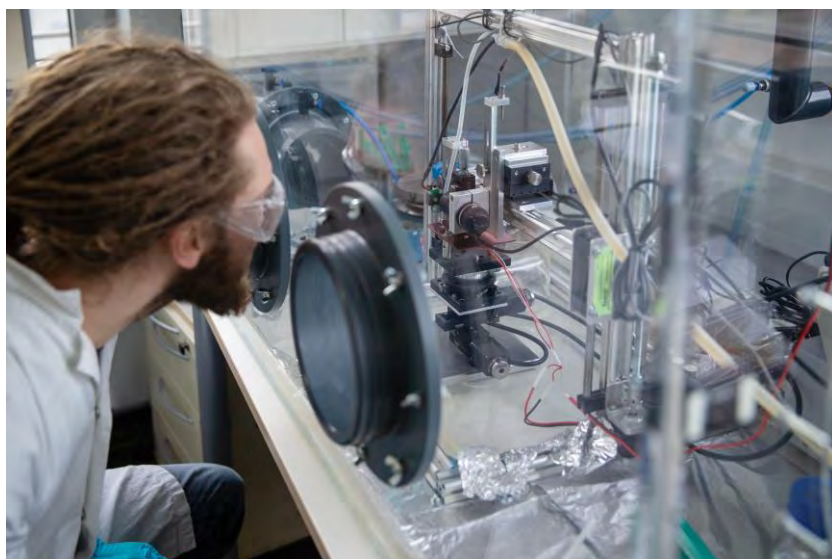
W2 Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

Projektbericht 2018

Die W2 Stützprofessur von Wolfgang Heiss beschäftigt sich mit der Synthese von lösungsprozessierten Halbleitermaterialien als Ausgangsmaterial für elektronische Anwendungen. Der Fokus der Arbeiten liegt auf kolloidalen Nanokristallen aus infrarot absorbierenden Blei-Salzen, auf Metall-Halid Perovskiten und auf organischen Pigmenten. Studiert werden die wichtigen fundamentalen Eigenschaften dieser Materialien, als auch deren möglichen Anwendungen in einfachen Bauelementen.



Aufbau für die Synthese von Halbleiter-Nanokristallen



Labordrucker für die Strukturierung von Halbleiterbauelementen

KONTAKT

Prof. Dr. Wolfgang Heiß

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
wolfgang.heiss@fau.de

Telefon
+49 911 56854-9216

Web
www.encn.de

1 Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien

1.1 Beteiligte Partner und Personen

Durchführender Projektpartner: FAU Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Wolfgang Heiss (FAU)

1.2 Arbeiten und Ergebnisse

Die Gruppe der W2 Professur beschäftigt sich mit der Synthese von neuen lösungsprozessierbaren Halbleitermaterialien. Eine Klasse dieser Halbleiter sind kolloidale Nanokristalle, die in nichtpolaren Lösungsmitteln durch organische Moleküle stabilisiert werden. Die üblichen Synthesemethoden solcher Nanokristalle eignen sich im Besonderen für sehr kleine Kristallgrößen, so dass Halbleitermaterialien üblicherweise größenabhängige optische Eigenschaften aufweisen. In diesen Halbleiter Nanokristallen führen Quantisierungseffekte vor allem zu einer erheblichen Blauverschiebung der fundamentalen Bandlücke. Ist das Ziel die Herstellung von Infrarotdetektoren mit Sensitivitäten bis zu möglichst großen Wellenlängen, so ist dieser Quanteneffekt eher unerwünscht. Es war deshalb gefordert, besonders große Nanokristalle herzustellen. Für Bleisulfid ist eine kritische Größe, bei der Volumeneigenschaften erreicht werden, ca. 20 nm. Um nun Bleisulfid Nanokristalle mit größeren Dimensionen herzustellen, wurde von uns eine neue Synthese entwickelt. Diese beruht auf der Verwendung eines neuen Pekursors und stellt die Kombination zweier früherer Synthesemethoden dar. Das Besondere der neu entwickelten Reaktion ist, dass sie vergleichsweise langsam abläuft und deshalb auch besonders gut kontrolliert werden kann. Darüber hinaus kann mit dieser Synthese die Größe der Nanokristalle über einen weiten Bereich eingestellt werden. Abbildung 1 zeigt Materialien die mit dieser Synthese hergestellt worden sind – die Teilchen sind dabei monodisperse und die erzielten Formen sind gleichförmig. Größen von ca. 6 nm bis zu ~ 170 nm wurden erreicht. Um aus diesen Nanokristallen ein elektronisches Bauteil herstellen zu können, wurde von uns ein neuartiger Ligandenaustausch angewendet. In dieser Arbeit wurden dazu Perovskit-artige Metallhalide mit einem anorganischem Gegenion verwendet. Daraus kann eine elektrisch leitfähige Matrix gebildet werden, die im Infraroten auch transparent ist. Dieser Ligandenaustausch erlaubte es, Infrarotdetektoren zu demonstrieren, die bis zu einer Wellenlänge von 3 Mikrometer eine hohe Photosensitivität aufweisen und somit die Bleisulfid Nanokristallphotodetektoren darstellen, die bis zu den längsten Wellenlängen funktionieren. Dabei waren die Photodetektoren auch relativ schnell, wobei sie Grenzfrequenzen erreichten, die oberhalb derer von kommerziellen Bleisulfid Detektoren liegen. Die chemische Synthese stellt somit eine einfache und kostengünstige Methode zur Herstellung von Infrarotdetektoren dar, die ähnliche Qualitäten aufweisen als kommerzielle Detektoren, dabei aber kostengünstiger sein können.

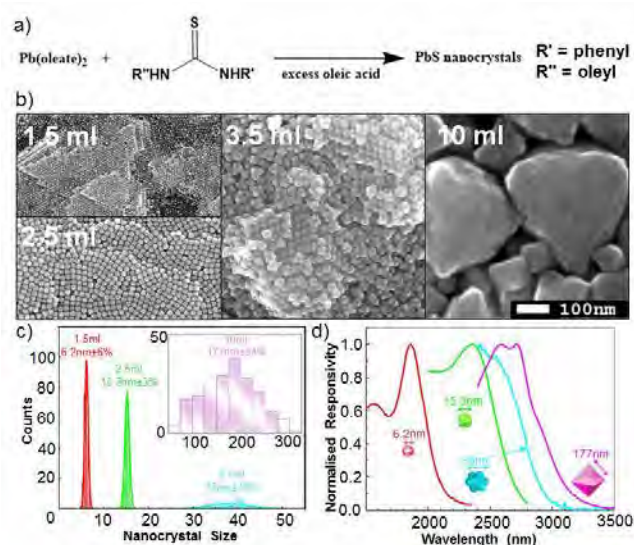


Abbildung 1 PbS Nanokristalle, die mit einer neuen Synthese hergestellt worden sind. In Abhängigkeit der Menge der koordinierenden Liganden werden Nanokristalle mit verschiedenen Größen gewonnen. Die Nanokristalle zeigen eine schmale Größenverteilung und

verschiedene Formen. Im Speziellen werden Photoleitungsspektren gemessen, die bis zu 3 Mikrometer Wellenlänge (der Bandlücke vom entsprechenden Volumenmaterial) sensitive Photoleitung zeigen.

Um Photodetektoren attraktiv für den Markt zu machen, sind nicht nur deren Eigenschaften wichtig, sondern auch deren Preis. In den Preis gehen dabei nicht nur Materialkosten ein, sondern auch Produktionskosten. Es ist deshalb auch ein Ziel, Methoden für die Herstellung von Detektoren aufzuzeigen, die einfach, schnell und günstig sind. Wir haben dazu in diesem Jahr das Drucken von Photodetektoren gestartet. Durch eine Kombination von Tintenstrahldrucken, 3-D Drucken und Abscheiden von Lösungen mit einem automatisierten Dispenser wurden Detektoren gedruckt. Der Aufbau der Detektoren, die aus einer metallischen Elektrode, einer Nanopartikel-Zwischenschicht und einer aktiven Bleisulfid Nanokristallschicht bestehen, ist in Abbildung 2 gezeigt. Eine wesentliche Entwicklung für die Herstellung der Photodetektoren aus der Lösung war dabei die Tintenformulierung der Bleisulfid Lösung. Während organische Polymere sehr einfach gedruckt werden können, zeigen Nanokristalllösungen einerseits eine zu geringe Viskosität zum Drucken und außerdem führen Trocknungsrisse üblicherweise zu unbrauchbaren Filmen. Als Lösung dieses Problems haben wir einen geringen Teil eines Polymers zu den Nanokristalltinten zugefügt, welcher diese Probleme weitgehend verhindert. Somit konnten Nanokristall basierende Detektoren in kürzerer Zeit und sehr preisgünstig gedruckt werden. Die gezeigten Methoden erlaubten auch ein einfaches Aufskalieren des Druckprozesses, und die Herstellung von Photodetektoren mit Eigenschaften, die gleich sind, wie die kommerziell erhältlichen Detektoren. Der Vorteil der gedruckten Detektoren ist der potentiell geringe Preis, und die Herstellung der Detektoren bei niederen Temperaturen. Letzteres ist nicht nur energiesparend, sondern erlaubt auch die Integration der Nanokristallbauteile auf Silizium basierende elektronische Bauteile. Letzteres ist ein wesentlicher Schritt in Richtung Hybridelektronik, die z. B. verwendet werden kann, um Siliziumkameras in den infraroten Spektralbereich zu erweitern.

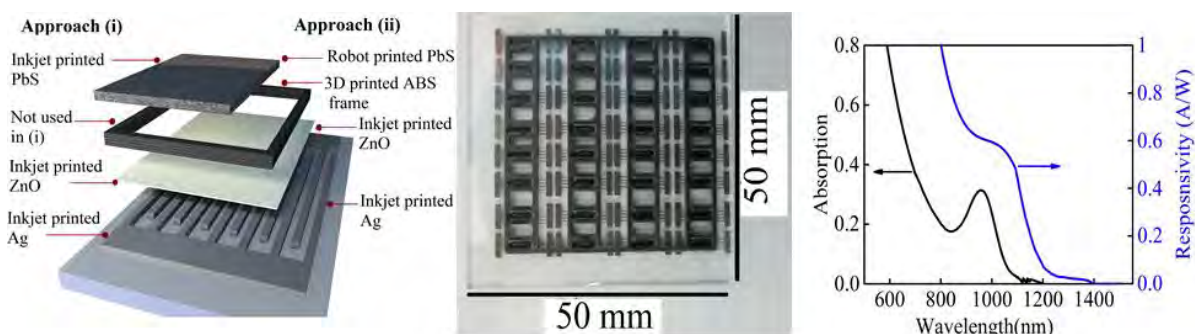


Abbildung 2 Gedruckte Photoleitungsdetektoren mit hohen Sensitivitäten im Infraroten. Links: Aufbau eines Detektors; Mitte: Ein gedrucktes Detektorarray mit 32 Detektoren.; Rechts: Absorption der verwendeten Nanokristalle in kolloidaler Lösung und Responsivität eines gedruckten Detektors.

1.3 Aussichten

Neben diesen Arbeiten zum Thema Nanokristalle wurde ein neues DFG-Projekt gestartet, in dem Detektoren für den Röntgenbereich hergestellt werden sollen. Die dafür gewählten Materialien sind lösungsprozessierte Perovskit-Halbleiter, die im Speziellen auch bleifrei sein sollen. Als erstes bleifreies Material wurde Hexan diammonium-BiI₅ in Form von Einkristallen synthetisiert. Dieses Material wurde deshalb gewählt, weil es ferroelektrische Eigenschaften aufweist. Diese Eigenschaft könnte es erlauben, einen photoferroischen Effekt unter Röntgenbeleuchtung zu beobachten, was eine wissenschaftliche Neuheit wäre. Die bisher hergestellten Einkristalle haben allerdings noch sehr geringe Photosensitivitäten aufgewiesen, so dass dieser gewünschte Effekt noch nicht beobachtet werden konnte.

Geplant ist deshalb die erfolgreichen Arbeiten basierend auf den Bleisulfid Nanokristallen weiter zu führen und im Speziellen für die Integration der Bleisulfid-Nanokristallelektronik mit der herkömmlichen Siliziumelektronik einen weiteren DFG Antrag zu stellen.

1.4 Kostenübersicht

Die Finanzierung der W2 Professur über Mittel des EnCN ist bis August 2019 geplant. Für die restlichen 8 Monate sind noch Mittel von 265T€ zur Verfügung. Diese Mittel werden über Personalmittel ausgegeben, als auch für einen Invest. Geplant ist der Ankauf eines Atomkraftmikroskops, das sich vor allem für Leitfähigkeitsmessungen hoher lokaler Auflösung eignet. Dieses Gerät sollte in weiterer Folge vor allem dem EET Projekt zu Gute kommen.

2 Schlussworte

Die lösungsprozessierten Halbleitermaterialien, die in der Gruppe synthetisiert und untersucht werden, sollen sich für die energieeffiziente Herstellung von elektronischen Bauteilen eignen. Dazu wurden Tinten formuliert, die bei relativ geringen Temperaturen in eine Halbleiterschicht umgewandelt werden können. Da die damit hergestellten Photodetektoren relative gute Eigenschaften aufweisen, ist man damit dem Traum einer druckbaren Elektronik ein wenig nähergekommen.

3 Vorträge & Poster 2017

1. Wolfgang Heiss, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, The International Conference on Materials Science and Engineering, Egypt-Japan University of Science and Technology, New Borg El- Arab, Alexandria, Egypt, March 11-13 (2018)
2. John Jairo Prias-Barragan, Katherine Gross, Jose D Perea, Nial Kilallea, Wolfgang Heiss, Christoph Brabec, Hernando Ariza-Calderon, and Pedro Prieto, Graphite Oxide Obtained From Bamboo as Possible Selective Contact For Solar Cells, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V., Fachverband Halbleiterphysik, Berlin, März 11-16 (2018)
3. Wolfgang Heiss, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals Symposium Photophysics, nanomaterials and more, University of Groningen, Groningen, NL, April 20 (2018)
4. Wolfgang Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals: Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, Colloquium on Advanced Materials, Universität Heidelberg, Heidelberg, June 7 (2018)
5. Wolfgang Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals: Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic pigment hierarchical nanocrystals, 7th International Conference on Smart Materials and Structures" (Smart Material Congress 2018), Vienna, July 2-3 (2018)
6. Oleksandr Mashkov, Mykhailo Sytnyk and Wolfgang Heiss, Organic pigments nanoarchitectures for heavy metal removal from water, Particle Based Materials Symposium, Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg, Erlangen, September 20-21 (2018)
7. N. Killilea, M. Wu, M. Sytnyk, A. Amin, E. Spiecker, W. Heiss, Bulk-like PbS Nanocrystals with Epitaxial Ligands Providing Photodetection Beyond 3000nm, Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg, Erlangen, September 20-21 (2018)
8. Oleksandr Mashkov, Mykhailo Sytnyk and Wolfgang Heiss, Organic pigments nanoarchitectures for heavy metal removal from water, nanoGe Fall Meeting 2018, Torremolinos, Spain, Oct 22-26 (2018)
9. Adam K. Budniak, Niall A. Killilea, Amir Abbas Yousefi Amin, Szymon J. Zelewski, Jan Kopaczek, Esty Ritov, Yaron Amouyal, Wolfgang Heiss, Robert Kudrawiec and Efrat Lifshitz, Synthesis, exfoliation and investigation of CrPS₄, MRS Fall Meeting, Boston, USA, November 25-30 (2018)

4 Veröffentlichungen 2017

- [1] Maciej Gryszel, Mykhailo Sytnyk, Marie Jakešová, Giuseppe Romanazzi, Roger Gabrielsson, Wolfgang Heiss, and Eric Daniel Głowacki, General Observation of Photocatalytic Oxygen Reduction to Hydrogen Peroxide by Organic Semiconductor Thin Films and Colloidal Crystals, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2018, 10 (16), pp 13253–13257

FORSCHUNGSBEREICH

Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Matthias Luther

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 67540

Web
www.encn.de

Elektrische Netze

Projektbericht 2018

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme beschäftigt sich am EnCN im Projekt 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 Abnehmern und Speichern innerhalb eines lokalen Verbunds schafft hierbei zusätzliche Flexibilität und wird als Mikronetz bezeichnet.

Derzeit entwickelt die Arbeitsgruppe das hybride Mikronetz- und Energiespeicherlabor *ENGiNe* (EES NanoGrid Nürnberg). *ENGiNe* dient als Demonstrationsanlage auf dem Gebiet der Speicherforschung und Netzintegration regenerativer Energien. Der schematische Aufbau der Anlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der Aufbau des Mikronetz- und Energiespeicherlabors und die laufenden Forschungstätigkeiten erfolgt durch den Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES). Als Partner ist die Siemens AG (Siemens CT und Siemens EM DG MG) beteiligt.

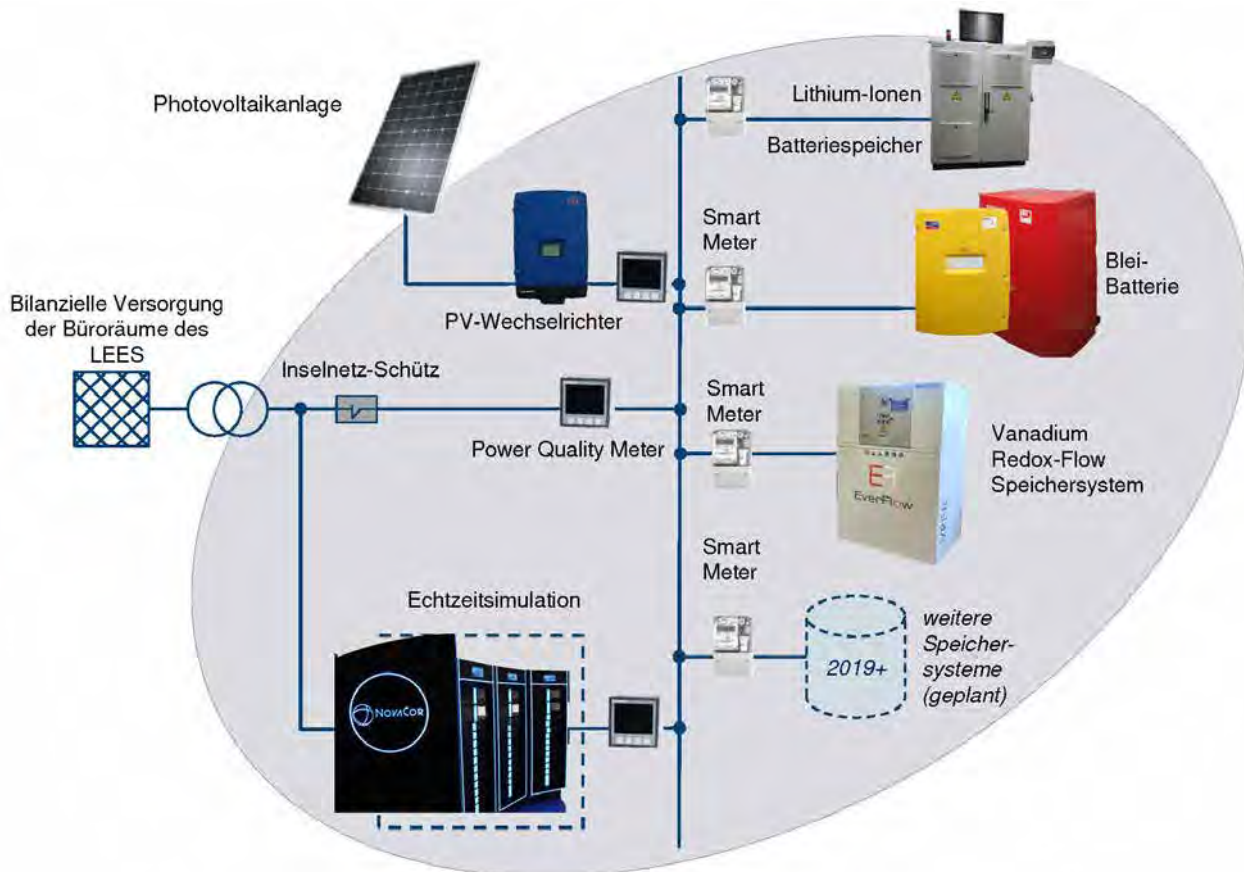


Abbildung 1: ENGiNe - Schematischer Aufbau

Die Versuchsanlage integriert alle relevanten Bereiche einer dezentralen regenerativen Energieversorgung in der Niederspannung. Die Umsetzung erfolgt dabei mit realen Betriebsmitteln, ergänzt durch simulative Komponenten. Erforscht wird dabei das Zusammenwirken der Einzelkomponenten (Einspeisung, Speicher, Last) in verschiedenen Konstellationen zur Netzdienlichkeit, zur Erhöhung des Eigenverbrauchs unabhängig von politischen Rahmenbedingungen oder auch zur Teilnahme am Regelenergiemarkt.

Für stationäre Stromspeicheranwendungen werden derzeit vorwiegend auf Lithium-Ionen basierende Speichertechnologien eingesetzt, da diese einen hohen Wirkungsgrad, kompakte Bauform, und Wartungsfreiheit bei vergleichsweise moderaten Anschaffungskosten garantieren. Das hybride Energiespeicherlabor *ENGiNe* integriert ein Speichersystem der *CATERVA GmbH* mit einer Nennleistung von 20 kW und einer Netto-Speicherkapazität von 22 kWh. bleibasierte Batteriespeicher stellen dagegen eine kostengünstige und robuste Form der Energiespeicherung dar. Die geringere spezifische Energiedichte im Vergleich zu lithiumbasierten Systemen ist bei stationären Speichern von untergeordneter Bedeutung. Nachteile von Blei-Batteriespeichern sind die relativ hohe Selbstentladerate, ein geringerer Wirkungsgrad und eine geringere Zyklenfestigkeit. Das im Speicherlabor *ENGiNe* integrierte Blei-Batteriespeichersystem besteht aus einem *IBC-Solstore* mit einer Nennleistung von insgesamt 4,6 kW und einer Netto-Speicherkapazität von 4 kWh. Des Weiteren wurde ein neuartiges Redox-Flow-Batteriespeichersystem der *SCHMID Energy Systems GmbH* auf Vanadium-Basis mit einer Nennleistung von 4,6 kW und einer Netto-Speicherkapazität von 15 kWh installiert. 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.

Zusätzlich sollen im folgenden Projektjahr zusätzliche Lithium-basierte Batteriespeichersysteme mit einer Gesamtkapazität von knapp 100 kWh in das Mikronetz integriert werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Verwendung unterschiedlicher Batteriechemien.

Abbildung 2 zeigt eine zeitliche Übersicht über den Projektverlauf. Die Planungs- und Konzeptionsphase wurde im Jahr 2016 abgeschlossen. Anschließend wurden bis Ende 2017 die Basiskomponenten installiert. Darunter eine Photovoltaikanlage mit einer Nennleistung von 17 kWp auf den Dachflächen des EnCN-Gebäudes, welche in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Photovoltaikanlage konnte schließlich am 08. Mai 2018 in Betrieb genommen werden und speist seither das Mikronetz. Als sichere Betriebsumgebung für die Batteriespeicher wurde eigens ein Brandschutzcontainer angeschafft.

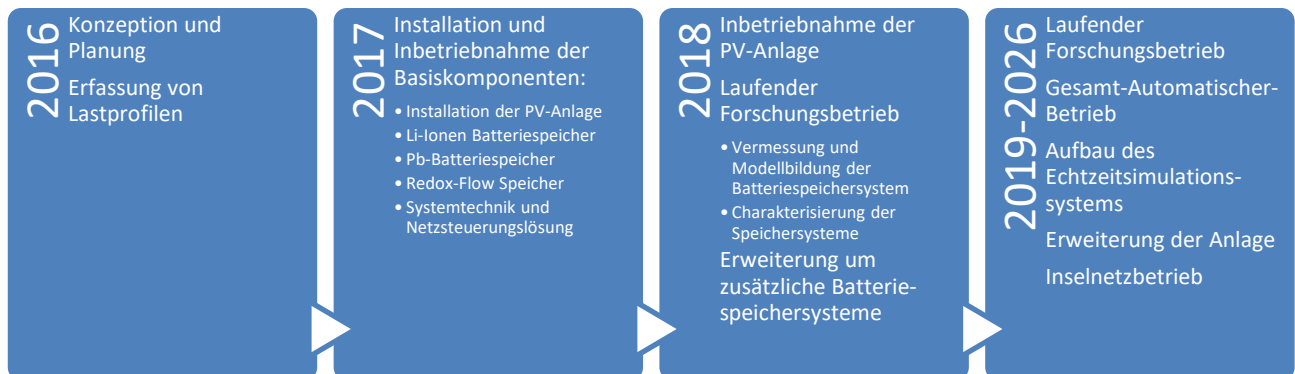


Abbildung 2: Zeithorizont des Projektes ENGiNe



Abbildung 3: Photovoltaikanlage auf dem Dach des EnCN

Zur Steuerung des Mikronetzes wird eine Netzsteuerungslösung der Siemens AG aufgebaut. Dieser Microgrid Controller übernimmt die optimale Balance und Steuerung aller Anlagenbestandteile. Das System wurde bereits installiert. Die Konfiguration und Anpassung an den vorhandenen Betriebszweck dauert aktuell noch an. Ein gesamt-automatischer Betrieb der Demonstrationsanlage ist ab Mitte 2019 zu erwarten.

In Zusammenarbeit mit der Siemens AG wurde im Projektjahr 2018 mit einer umfangreichen Modellierung der Speichersysteme begonnen. Hierfür werden die Speicher vermessen, um die spezifischen Eigenschaften und das Verhalten der Systeme zu ermitteln, bevor diese dann in ein Modell überführt werden.

Im Laufe des kommenden Jahres soll ein Echtzeitsimulationssystem die realen Anlagenkomponenten ergänzen. Dieses bietet die Möglichkeit, im realen Mikronetz simulative Anlagenkomponenten hinzuzufügen oder als Netzsimulator zu fungieren um auch Betriebssituationen zu testen, die im realen Netz nur unvorhersehbar eintreten. Als Schnittstelle

zwischen Simulation und Hardware dient ein hochdynamischer, bidirektionaler Leistungsumrichter mit einer Gesamtleistung von 45 kVA. Der Aufbau des Echtzeitsimulationssystems ist für das Projektjahr 2019 vorgesehen.

2 NETZ:KRAFT

Aufgrund einer stetigen Zunahme der Komplexität elektrischer Energieversorgungsnetze, sind Analyse- und Bewertungsstrategien sowie Verbesserungsmaßnahmen für Netzschutzsysteme entsprechend weiter zu entwickeln. Andernfalls sind Netz- und Schutzsicherheit und damit die Versorgungszuverlässigkeit gefährdet. Gleiches gilt für den Zustand eines Netzwiederaufbaus, bei dem, ohne gesicherte Schutzfunktionalität, eine Zuschaltung bzw. Inbetriebnahme eines Netzes als höchst fahrlässig einzuordnen ist.

Zum 30. Juni erfolgte der erfolgreiche Abschluss des Projektes NETZ:KRAFT, welches sich mit der Thematik des Netzwiederaufbaus unter dem Gesichtspunkt zukünftig veränderter Kraftwerksstrukturen befasste. Im Forschungsvorhaben wurde daher die Analyse, Bewertung und Optimierung von Schutzsystemen vor, während und nach dem Netzwiederaufbau untersucht. Bei den Projektschwerpunkten, welche maßgeblich von der FAU bearbeitet wurden, handelt es sich zum einen um die Betrachtung des Einsatzes von netzbildenden Stromrichtern zum Zweck des Versorgungswiederaufbaus und um die Analyse der Schutztechnik während dieses Prozesses. Das thematische Spektrum der behandelten Fragestellungen umfasst dabei sowohl den Aufbau von Stromrichtersystemen, als auch deren Regelungsstrategien und eröffnet hinsichtlich der Schutztechnik den detaillierten Blick vom übergeordneten Schutzkonzept bis hin zu einzelnen Relaisalgorithmen. Die in diesen Themengebieten erarbeiteten Erkenntnisse ermöglichen die Neuausrichtung und situationsorientierte Anpassung zukünftiger Netzwiederaufbaustrategien, auf deren erfolgreiche Umsetzung wir im Ernstfall angewiesen sind.

Insgesamt sind 20 Partner im Konsortium von NETZ:KRAFT, darunter sind das Fraunhofer Institut IEE Kassel, sowie die vier Übertragungsnetzbetreiber (TenneT TSO GmbH, Amprion GmbH, TransnetBW GmbH, 50Hertz Transmission GmbH) und als Industrieunternehmen die SMA Solar Technology GmbH. Die Förderung des Projekts erfolgt durch das BMWi.

<https://forschung-stromnetze.info/projekte/netzwiederaufbau-mit-zukuenftigen-kraftwerkstrukturen/>

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.

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. <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 Versorgungssicherheit und -qualität.

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 Beitrags kurativer Maßnahmen zur Versorgungssicherheit.

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 sich mit Verbundpartnern auszutauschen.

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 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.

5 Schlussworte

Die Arbeitsgebiete des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme im Projekt 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 2018

- [1] S. Resch, S. Och, M. Luther. Conception, Modelling Approach and Practical Implementation of a Hybrid Laboratory-Based Microgrid. NEIS-Konferenz, Hamburg, 2018
- [2] R. Dimitrovski *et al.*, Analyzing Subsynchronous Resonance Using Component Connection Method. IEEE PES GM, Portland, 2018.
- [3] Meyer G. J.; Jäger J. Protection Security Assessment during Fault and Post-Fault phase, IEEE PES General Meeting in Portland, Oregon, USA, August 2018
- [4] Meyer G. J.; Romeis C.; Jäger J. Automatisierte Bewertung der Schutzsicherheit unter Berücksichtigung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge in Hochspannungsnetzen ETG/FNN Fachtagung Schutz- und Leittechnik in Berlin; Februar 2018
- [5] Meyer G. J., Dauer M., Jäger J. Flexible Schutzbewertung für multivariate Netze anhand fuzziverzierter Einstellparameter des Distanzschutzes, ETG-CIRED-Workshop 2018, Berlin, Germany, November 2018

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



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
www.tinyurl.com/hxxmrpq

Speicher A

Projektbericht 2018

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 TW_h

und damit in systemrelevanten Größenordnungen zu speichern. Entsprechende dieser drei Speicheraufgaben und -strategien werden in den Teilprojekten Systeme konzipiert und an Prototypenanlage erprobt und demonstriert.

Im ersten Projektjahr 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. Im Jahr 2018 wurden diese Vorarbeiten zumeist abgeschlossen und mit der Auswahl und Beschaffung von Komponenten sowie schließlich dem Bau der Versuchsanlagen begonnen.

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 bereits im Vorjahr untersuchten Varianten des HP-ORC-Systems konnten um eine Betrachtung des stationären Teillastverhalten erweitert werden. Die hierbei aus der Literatur übernommenen Daten des Kompressors und Expanders erlauben eine umfassende numerische Untersuchung im gesamten Leistungsbereich des Systems. Als eine Schlüsselerkenntnis hat sich hierbei gezeigt, dass die Abstimmung der drei Einzelprozesse des Gesamtsystems, bestehend aus der Wärmepumpe, dem thermischen Speicher und dem ORC, auch bei unterschiedlichen Teillasten bei Be- und Entladevorgängen keine Pinch Point Fehler hervorruft. Dies ermöglicht trotz Änderungen in der Effizienz des Systems im Teillastverhalten ein einheitliches thermisches Profil beim Be- und Entladen des Speichers. Somit ist ein variabler Lastgang in den einzelnen Teilprozessen möglich ohne dadurch andere Teilprozesse zu beeinflussen.

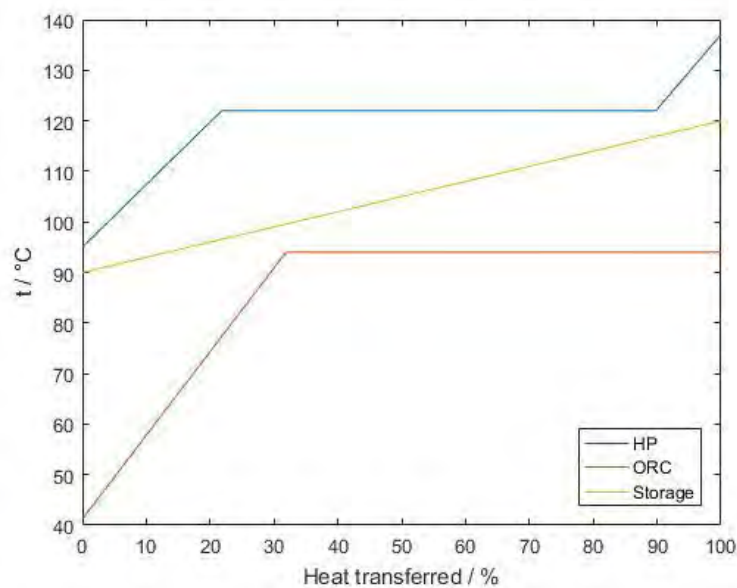


Abbildung 1: T-Q Diagramm der speicherseitigen Wärmeübertragung des HP-ORC-Systems

Für den Vergleich mit anderen Speichersystemen wie Li-Ionen-Akkumulatoren, Druckluftspeichern oder Pumpspeicherkraftwerken ist neben der Effizienz des Gesamtprozesses auch die ökonomische Seite des Systems von Bedeutung. Die hierfür notwendige wirtschaftliche Evaluierung der verschiedenen Optionen aus SP 1-1 AP 1 wird mit der allgemeinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus SP 1-1 AP 5 zusammengelegt und ein allgemeines Modell für die Berechnung der Anlagenkosten gebildet. Ziel dieses allgemeinen Modells ist es direkt aus den Ergebnissen der thermodynamischen Simulationen eine sowohl spezifische als auch absolute Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der jeweiligen Konfiguration zu erhalten. Die damit verbundene Möglichkeit eine Anlagenskalierung der verschiedenen Schaltungsvarianten und die damit verbundenen Effekte zu untersuchen, stellt neben dem größten Vorteil auch die größte Herausforderung dieser Herangehensweise dar. In diesem Abschnitt erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insb. Wirtschaftstheorie, dessen Erfahrungen in das Modell einfließen.

Aktuell erfolgen dynamische Untersuchungen des Systemverhaltens mit Hilfe eines transienten Modells und die Ausweitung der Untersuchungen auf konkrete Anwendungsfälle.

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

Daniel Steger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Zur Validierung des Speicherkonzepts basierend auf einer reversiblen HP-ORC-Anlage und einem Heißwasserspeicher, soll eine Pilotanlage im Maßstab von ca. 20 kW_{el} aufgebaut und erprobt werden. Da eine solche Anlage aktuell nicht marktverfügbar ist, erfolgt die gesamte Planung und der Aufbau am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik.

Hierzu wurden zunächst in enger Abstimmung mit den Projektpartnern die Rahmenbedingungen der Versuchsanlage in einem *Design Freeze* festgelegt. Es waren dabei vor allem die (obere und untere) Speichertemperatur und das Arbeitsfluid kritische Parameter, die intensiv diskutiert wurden. So zeigte sich beispielsweise, dass sich die Speicherkapazität und der Gesamtwirkungsgrad – beides wichtige Zielgrößen in der Prozessauslegung – nicht unabhängig voneinander optimieren lassen. Aufgrund dessen wurde ein Kompromiss festgelegt, der eine sinnvolle Speicherkapazität bei einem guten Gesamtwirkungsgrad ermöglicht. Bei der Festlegung des Arbeitsfluids für den Prozess spielten neben den Ergebnissen aus der Prozesssimulation auch umweltrelevante Faktoren (Global Warming Potential, Ozone Depletion Potential) und kostenrelevante Faktoren (benötigte Menge, Beschaffungspreis) eine wichtige Rolle. Das Ergebnis des *Design Freeze* und somit die Grundlage der weiteren Anlagenplanung ist schließlich die Festlegung der Speichertemperaturen auf 90°C und 120°C und die Wahl des Arbeitsfluids R1233zd.

Aufbauend darauf erfolgte nun die Festlegung der verschiedenen Anlagenkomponenten (Wärmeübertrager, Pumpen, Ventile, Verdichter und Expander), die nach enger Absprache mit den Herstellern geschah. Mit Hilfe einer CAD-Software wurden die Komponenten in mehreren Revisionen in einem Anlagenmodell positioniert, bis schließlich der optimale Aufbau gefunden wurde (siehe Abbildung 2). Die Rohrleitungsplanung erfolgte nach den einschlägigen Normen und es wurde ein Sicherheitskonzept erstellt.

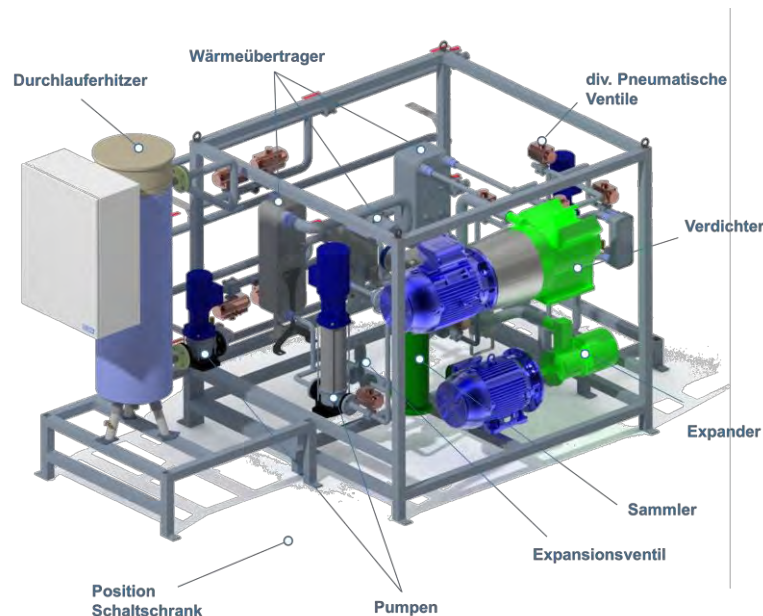


Abbildung 2: CAD-Zeichnung der HP-ORC-Pilotanlage

Bis Ende des Jahres 2018 konnten alle großen Komponenten der Anlage bestellt werden, die Lieferung erfolgte mehrheitlich auch bereits bis zum Ende des Jahres 2018. Mit Beginn des Jahres 2019 startet der Aufbau der Anlage sowie die Programmierung der notwendigen Leittechnik. Insgesamt entspricht der Stand des Teilprojekts dem im Antrag skizzierten Zeitplan und es ist momentan nicht mit Verzögerungen zu rechnen.

1.3 Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für die Modellregion Wunsiedel

Sebastian Staub, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Die technischen und ökonomischen Randbedingungen zur Bewertung des Einsatzes der reversiblen ORC-Technologie am Beispielstandort Wunsiedel wurden ermittelt. Die Ergebnisse der vor Ort bei Verbrauchern installierten Messtechnik liegen vor und wurden umfangreich ausgewertet. Damit war es möglich reale Lastgänge für Wärme- und Strombedarf exemplarischer Verbraucher im Versorgungsgebiet mit hoher zeitlicher Auflösung zu ermitteln.

Auf Grundlage der ermittelten Daten erfolgt nun die Dimensionierung einer Demonstrationsanlage. Ein erstes Modell dazu ist bereits erstellt. Damit werden nun drei verschiedene Szenarien betrachtet und unter wirtschaftlichen Aspekten miteinander verglichen und bewertet. Das erste Szenario umfasst die Realisierung eines Speichersystems aus einer elektrischen Heizung und einer kommerziell verfügbaren ORC-Anlage (vgl. Antrag). Dabei soll der bereits am Standort Wunsiedel vorhandene Wärmespeicher genutzt werden. In Szenario 2 und 3 wird schließlich die Realisierung einer HP-ORC-Anlage untersucht. Dazu kann der vorhandene Wärmespeicher aufgrund der höheren Temperatur- und Druckniveaus nichtmehr verwendet werden. In diesen Szenarien muss also der Bau einer neuen HP-ORC-Anlage und eines Druckwärmespeichers berücksichtigt werden. Der Unterschied zwischen Szenario 2 und 3 liegt in den Temperaturniveaus des ORC-Prozesses bei der Rückverstromung der eingespeicherten Energie. Szenario 2 betrachtet hier die Kühlung gegen Umgebungsluft, was hohe ORC Wirkungsgrade verspricht, gleichzeitig aber keine Nutzung der Abwärme mehr ermöglicht. Deshalb soll in Szenario 3 die Kühlung auf einem Temperaturniveau von etwa 65 °C betrachtet werden, was eine Nutzung der Abwärme im vorhandenen Fernwärmenetz ermöglicht.

Neben der Machbarkeitsstudie für die Region Wunsiedel wird noch eine zweite Studie zur Realisierung einer 10 MW Anlage durchgeführt. Hierzu wurde bereits mit der Suche nach einem geeigneten Standort begonnen. Die Wärmeversorgung soll für diese Großanlage durch Geothermie erfolgen. Erste Gespräche mit dem GeoZentrum Nordbayern zur Festlegung eines potentiellen Standortes haben bereits stattgefunden.

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 Sensibler Wärmespeicher wird von Christoph Regensburger, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, bearbeitet. Die Bearbeitung des Projekts erfolgt in engerer Zusammenarbeit mit den Projektpartnern des Teilprojekts Speicher A 1.1 und Speicher A 1.2.

Wie im Projektplan vorgesehen wurde der Aufbau eines Simulationsmodells zu Darstellung des transienten Verhaltens des Speichers, beim Be- und Entladen durchgeführt. Hier sind weitere Arbeiten geplant, um möglichst auch Wärmeverluste und Vermischungseffekte im Residualbetrieb darzustellen. Hierbei ins besonders die Initialisierung von großer Bedeutung.

Ein Prozessfließbild des Speicherbehälters mit Peripherie wurde erstellt und als dreidimensionaler Zusammenbau in CAD geplant. Die Festlegung der Speichergröße auf zwei 4m³ Heißwasserspeicher erfolgte im Rahmen eines Design-Freeze in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Dabei ist die Speichergröße ein sinnvoller Kompromiss aus Investitionsvolumen, maximaler Bodenlast am Aufstellungsort und dem wissenschaftlichen Mehrwert der Anlage.

Der Speicherhub wurde auf 90°C-120°C festgelegt. Von besonderer Bedeutung war dabei die Durchführung einer Pareto-Optimierung. Dabei wurden der PtP-Wirkungsgrad und die effektive elektrische Speicherkapazität für unterschiedliche Temperaturspreizungen aufgetragen. Dabei wurde der oben genannte Speicherhub von 30 K im relativ niedrigen Temperaturbereich als besonders vielversprechend herausgearbeitet. Dieser Temperaturhub wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und Beteiligten am HP-ORC Prozess aus Speicher A TP 1.1 ermittelt und in einem Design-Freeze festgehalten.

Die Vorversuche an der im letzten Jahresbericht vorgestellten Versuchsanlage wurden durchgeführt. Dabei sind auch weiterhin Versuche geplant. Insgesamt wurden bisher 5 unterschiedliche Einbauten mit drei unterschiedlichen Wirkprinzipien vermessen. Dabei wurden die Versuche teilweise am stehenden und teilweise am liegenden Speicher durchgeführt.

Das Fallbeispiel in Abbildung 3 zeigt den Verlauf der dimensionslosen Temperatur eines vertikalen Heißwasserspeichers am Auslass bei einem Beladevorgang, aufgetragen über das zugeführte Heißwasservolumen. Dabei fasst der Speicher in etwa 40 l Wasser. Um die Grenzschicht und damit die Verbesserung des Speichers zu ermitteln wird die Thermokline ebenfalls durch den Auslass abgeführt, um die Breite der Vermischungszone und den exergetischen Wirkungsgrad zu ermitteln.

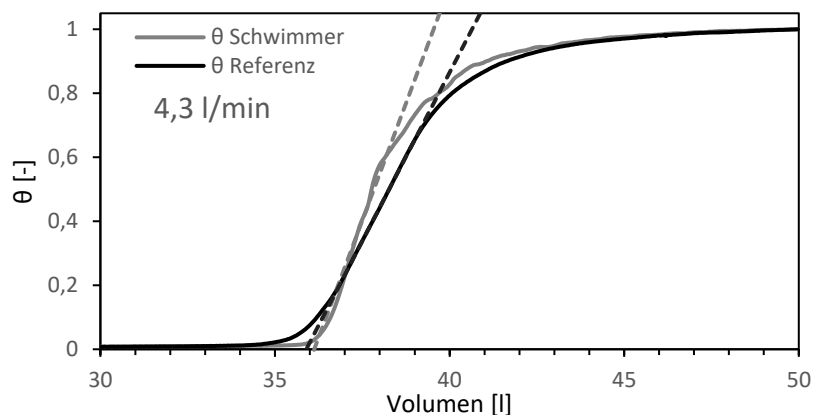


Abbildung 3: Optimierung der Beladung des sensiblen Wärmespeichers mittels Einbaute, bei einem Volumenstrom von 4,3 l/min

Der in der Abbildung aufgezeigt Versuchsdurchlauf weist im Vergleich zum Speicher ohne Einbauten eine Verbesserung des exergetischen Wirkungsgrad von 83,6 % auf 85,8 % auf. Dabei verringert sich das Volumen der Thermokline von 4,78 l auf 3,44 l. Die Mittel zur Beschaffung der großen Anlagenteile des Speichersystems werden voraussichtlich Anfang 2019 ausgeschöpft. Die Bestellung der großen Anlagenkomponenten erfolgt voraussichtlich im Januar 2019. Dies geschieht im Einklang mit dem im Antrag formulierten Projektplan. Die im Finanzplan vorgesehen Mittel werden dazu in das nächste Jahr übernommen.

Die Lieferung der Behälter erfolgt voraussichtlich im Frühjahr 2019. Die Peripheriekomponenten werden bereits ab dem ersten Quartal 2019 vormontiert. Geplant ist eine Fertigstellung der Montagearbeiten und des Schaltschranks bis zum Ende des zweiten Quartals 2019. Ein weiterer Ausbau des Simulationsmodells ist ebenfalls geplant. Die Inbetriebnahme des Speicherabschnitts soll im dritten Quartal 2019 abgeschlossen werden. Damit werden die Aufgaben entsprechend des Antrags erfüllt.

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

Thomas Kohler, Karsten Müller (TVT)

Im Arbeitspaket 2 sollten am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik unter der Leitung von Dr.-Ing. Karsten Müller Systeme zur Nutzung der Schmelzwärme von $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ sowie der Hydratisierungswärme desselben Stoffsystems für die drucklose Speicherung thermischer Energie bis 150 °C untersucht werden. Hierbei wurden im zweiten und letzten Jahr des Unterprojekts die Evaluierung der Technologien abgeschlossen und entsprechende Empfehlungen erarbeitet und publiziert.

Thermische Energiespeicherung auf Basis der Hydratisierungswärme

Die im Vorjahr begonnen Arbeiten zur Nutzung reversibler Hydratisierung von Magnesiumchlorid als thermischen Energiespeicher konnten abgeschlossen und publiziert werden.

Als Problem erweist sich die sehr niedrige Deliqueszenzfeuchte von 33 %. Eine Konsequenz daraus ist das Verkleben der Partikel, die im Extremfall zu einem einzigen, sehr großen Klumpen verbacken. Insbesondere am Reaktoreingang kommt es zur Ausbildung eines stark verklumpten Bereichs. Als Folge muss konstatiert werden, dass der Einsatz der Hydratisierung von Magnesiumchlorid zur thermischen Energiespeicherung über eine größere Anzahl von Zyklen technisch nicht sinnvoll ist. Der Schwerpunkt wurde deshalb auf latenter Wärmespeicherung gelegt.

Thermische Energiespeicherung auf Basis latenter Wärme

Als Material für die Speicherung latenter Wärme wurde wiederum Magnesiumchloridhexahydrat untersucht. Die wesentliche Herausforderung stellt dabei der Wärmetransport dar. Um diesen näher zu untersuchen und verbesserte Wärmeübertragungskonzepte abzuleiten, wurde ein Simulationsmodell aufgesetzt. Zur Validierung wurden die im Vorjahr bereits begonnen Messungen mittels Computertomographie (CT) verwendet. Dadurch lässt sich die Abweichung der Simulation von der Realität sehr viel umfassender erfassen und Schwachpunkte des Modells identifizieren.

In der Abbildung 4 sind die Größenparameter der Ausbreitungsfront jeweils als durchgezogene Linie für die CT-Messungen dargestellt und als gestrichelte Linie für das Basismodell. Die Verläufe von Messung und Simulation sind über weite Strecken sehr ähnlich, weisen in einigen Bereichen aber erhebliche Unterschiede auf. An der Spitze der Rippe überschätzt das Modell die Schmelzgeschwindigkeit zunächst erheblich, während sie zwischen den Rippen sehr gut vorhergesagt wird. Mit Hilfe der neuen Messmethodik konnte die Ursachen für diese Fehlvorhersagen genauer identifiziert werden. Basierend darauf wird es möglich sein, zukünftige Modelle für Phasenwechselmaterialien zu verbessern.

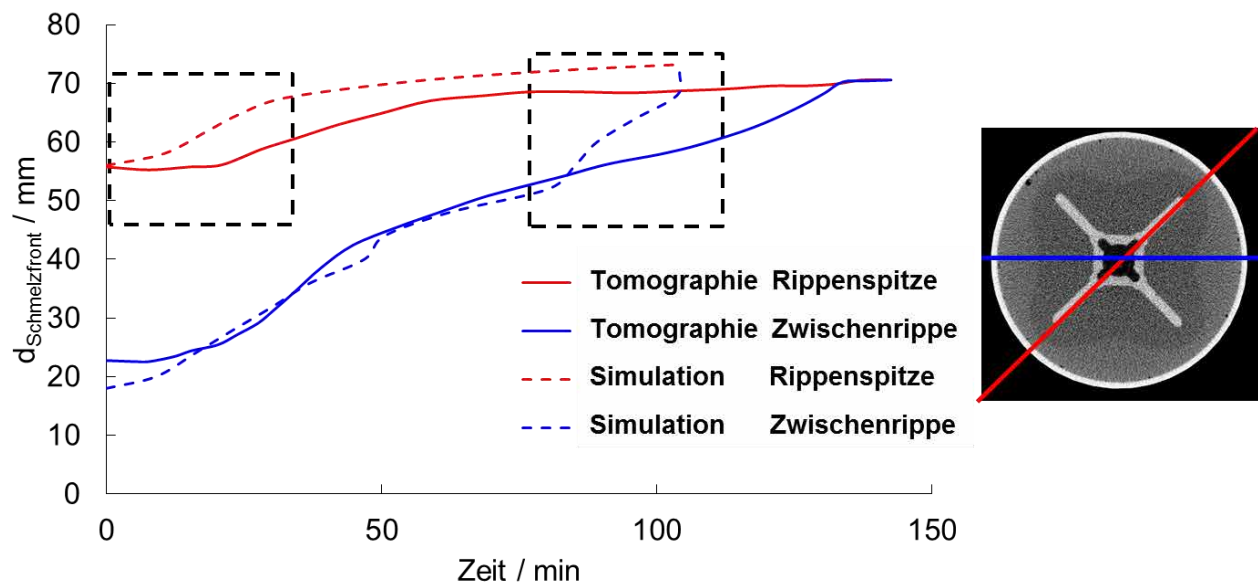


Abbildung 4: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schmelzfront zwischen und an den Spitzen der Wärmeüberträgerrippen in der Simulation und gemessen mit Computertomographie

2.3 Arbeitspaket 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)

Zur Bearbeitung des Arbeitspakets ist seit dem 01.01.2017 mit den Fördermitteln für Personalkosten Herr Dr.-Ing. Peter Bazan als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt. Ziel des Arbeitspaketes ist die dynamische Simulation der Energieflüsse von Wärmespeichern, die in das Energiesystem integriert sind und überschüssige Wärme und Strom nutzen. Mit den Simulationsmodellen sollen die Dimensionierung und geeignete Betriebsweisen für den wirtschaftlichen Betrieb von Niedertemperatur-Speichern untersucht werden.

Mit dem im Jahr 2017 entwickelten Niedertemperatur-Speicher-Modell bestehend aus Niedertemperatur-Speicher und HP-ORC-System wurden nach ersten Ergebnissen [1] die Berechnungen der Dimensionierung und Grundlastfähigkeit in 2018 mit neuen Kenngrößen für die Einzelsysteme durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten unter enger Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern [2] **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die benötigten Kenngrößen des HP-ORC-Systems wurden durch das TP SP1-1 bereitgestellt und die Kenngrößen für die Niedertemperatur-Speicher wurden in den Arbeitspaketen 1 und 2 des TP SP1-2 ermittelt.

Das Niedertemperatur-Speicher-Modell wurde in zwei Richtungen weiterentwickelt. Einerseits wurde das Modell bestehend aus Niedertemperatur-Speicher und HP-ORC-System im Jahr 2018 in i7-AnyEnergy-Komponenten transformiert und in den Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy integriert (Abbildung 5), der auf der 7. D-A-CH+ Konferenz für Energieinformatik der interessierten Forschungsgemeinschaft vorgestellt werden konnte [3]. Andererseits wurde das Modell des Niedertemperatur-Speichers verfeinert, indem die Wärmeschichten des Speichers und deren

Wärmeaustausch in das Modell des Warmwasserspeichers integriert worden sind. Mit dem verfeinerten Modell wurde der Aufbau eines Szenarios für die Integration des Speichersystems in einen Häuserverbund begonnen.

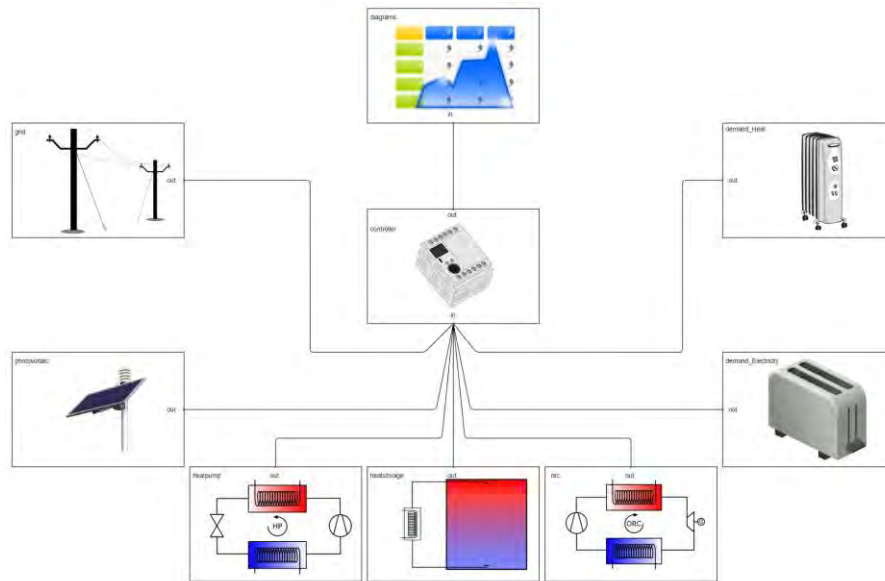


Abbildung 5: Modellierung des Niedertemperatur-Speicher-Modells als i7-AnyEnergy-Komponenten

Zur Abschätzung der Umweltverträglichkeit des HP-ORC-Speicher-Systems wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern mit einem Life Cycle Assessment für das System begonnen (Abbildung 6). Damit soll untersucht werden, welche zusätzlichen Vorteile eines solchen Speichersystems sich bezüglich Batteriespeichersystemen ergeben.

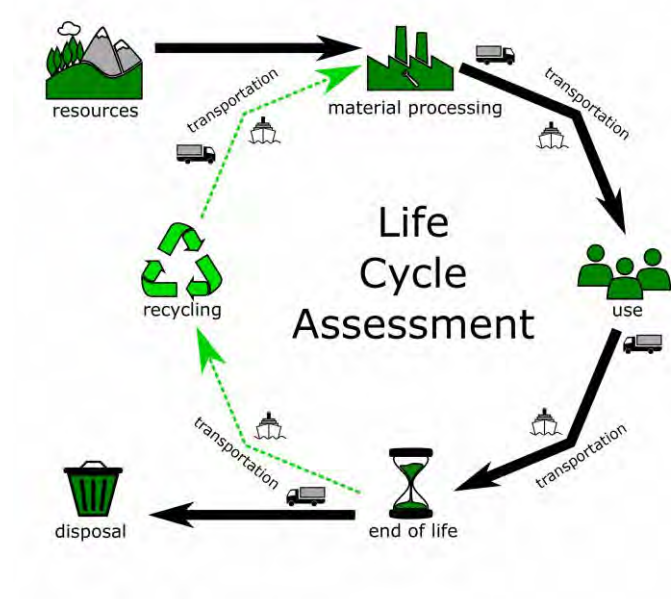


Abbildung 6: Struktur des Life Cycle Assessment für die Bewertung des Niedertemperatur-Speicher-Modells

Im Jahr 2019 soll das Life Cycle Assessment für das Niedertemperatur-Speicher-System abgeschlossen werden. Die Integration des Speichersystems im kleinskaligen Bereich in einen Häuserverbund wird erfolgt sein und es werden die Berechnungen bezüglich des wirtschaftlichen Betriebs durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen dann die Modellierung und Analyse von großen Niedertemperatur-Speichern in Verbindung mit Geothermie erfolgen.

3 Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher (SP2)

3.1 Dynamische Speicherung von Überschussstrom in isothermen Heatpipe-Carbonatspeichern

Christoph Lange, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Das Teilprojekt zur dynamischen Speicherung von Überschussstrom dient der Entwicklung und Demonstration eines neuartigen auf Carbonaten basierenden thermochemischen Speichers zur hochdynamischen Dampferzeugung. Durch Heatpipes (Wärmeleitrohre) wird der Carbonatspeicher isotherm betrieben und der Ein- und Austrag von Wärme weitaus effizienter und dynamischer möglich werden, als dies mit herkömmlichen thermochemischen Speichern möglich ist.

Die Arbeiten im Berichtszeitraum widmeten sich vor allem dem Design der Heatpipes und des mit Wärme aus dem Carbonatspeicher gespeisten Dampferzeugers.

Experimente am Heatpipe-Dampferzeuger und Optimierung von Heatpipes

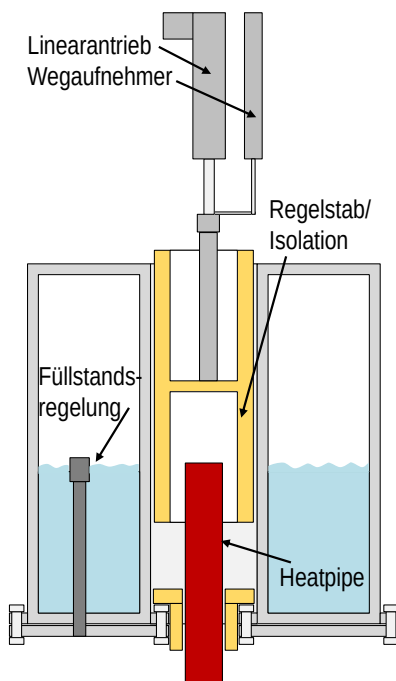
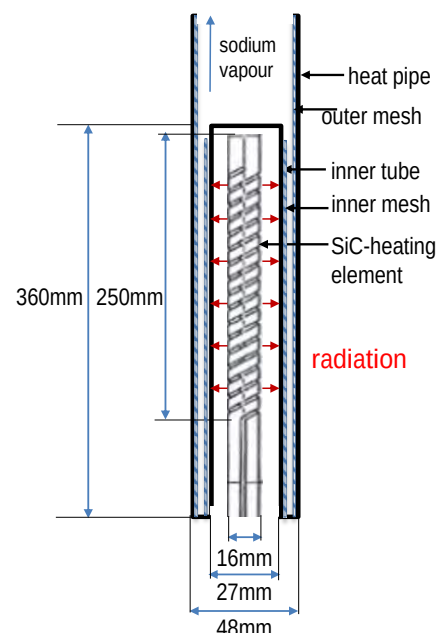


Abbildung 7: innovatives Heatpipe-Dampferzeuger-Konzept



Abbildung 8: links: heißes SiC-Element und Position in der Heatpipe; rechts: Heatpipe-Beheizung mit SiC-Element schematisch



Im Laufe des Jahres 2018 wurde das innovative Konzept des Heatpipe-Dampferzeugers, welches auf der ein- und ausfahrbaren Isolierung des Dampferzeugers gegenüber der Heatpipe beruht, experimentell untersucht. Mithilfe des Anfang des Jahres fertiggestellten Heatpipe-Dampferzeuger Teststands wurde das Regelkonzept 2018 erfolgreich validiert und für den Einsatz in der Pilotanlage freigegeben.

Die Experimente schlossen Tests mit variierten Heatpipe-Designs ein, um eine optimale Leistungsübertragung sowohl bei der Beheizung der Heatpipe mittels SiC-Element (Abbildung 9) sowie bei einer durch einen Rohrofen simulierten Wärmezufuhr (Entladen des Carbonatspeichers bei der Karbonierung) zu gewährleisten. Im Besonderen wurden verschiedene Natriumfüllmengen und Mesh-Sorten am Innenrohr getestet, um eine Benetzung des Heatpipe-Innenrohrs mit Natrium und den Wärmeabtransport aus der Verdampferzone durch verdampfendes Natrium zu gewährleisten. Abbildung 9 zeigt die durch die verschiedenen Heatpipes übertragenen Leistungen, welche durch Messung der Kondensatmengen am Dampferzeuger bestimmt wurden. Heatpipe 2 und 4 haben dabei eine sehr ähnliche Natriumfüllmenge und Heatpipe 1 eine ca. 1,5 Mal so große Füllmenge. Heatpipe 4 hat wesentlich gröberes Mesh am Innenrohr (Meshzahl 60) als Heatpipe 1 und 2 (Meshzahl 200). Die Leistungsübertragung durch das SiC-Element ist bei

Heatpipe 4 am höchsten. Eine höhere Natriumfüllmenge in Heatpipe 1 lässt insbesondere eine höhere Leistungsübertragung von außen (Speicherentladung) zu.

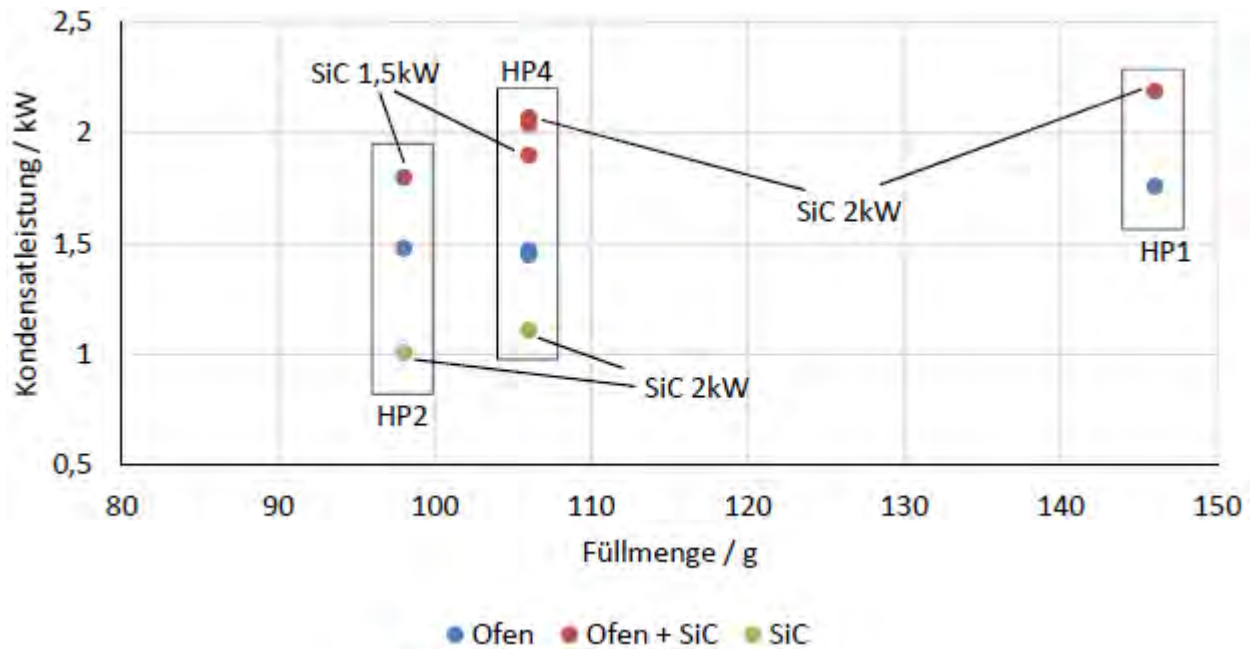


Abbildung 9: Vergleich der Kondensatleistungen bei variierter Heizleistung von Innen (SiC-Element im Innenrohr) und Außen (Ofen)

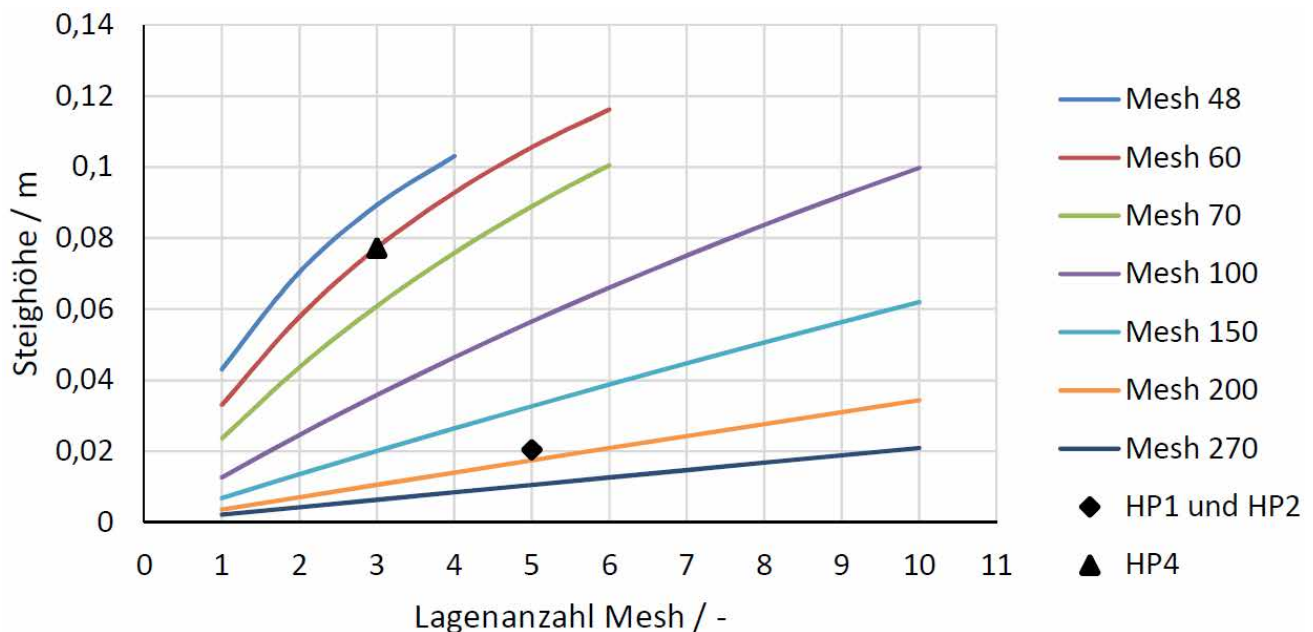


Abbildung 10: theoretisch berechnete Steighöhen des Natriums bei verschiedenen Meshfeinheiten (Maschen pro Zoll) und Lagenanzahlen um das Innenrohr. HP 1 und HP 2 mit 200er Mesh, HP 4 mit 60er Mesh

Wie in Abbildung 10 zu erkennen, kann bei Heatpipe 4 bereits eine deutlich höhere Steighöhe des Natriums erreicht werden. Das hat eine höhere Verdampfungsrate bei Betrieb des SiC-Elements zur Folge (HP4 vs. HP2) bei annähernd gleicher Natriumfüllmenge (Abbildung 9). Da die Verdampferzone allerdings 25 cm lang ist (Abbildung 9), was allein mit Kapillarkräften im Mesh nicht als Steighöhe erreichbar ist, wurde ein Konzept entwickelt, um den Rückstrom des Kondensats von der Kondensator- zur Verdampferzone direkt auf das Innenrohr zu leiten (Abbildung 11).

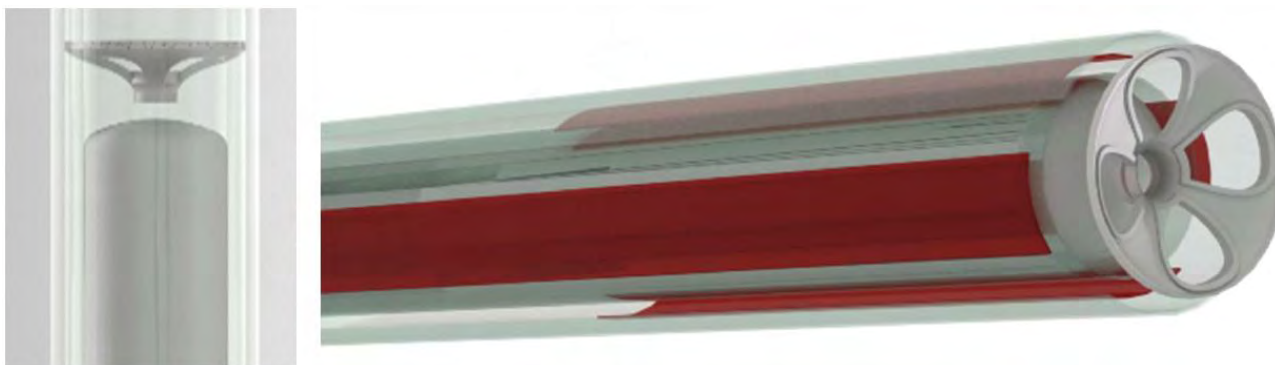


Abbildung 11: Konzept zur Verbesserung der Meshbenetzung am Innenrohr (grün: feines Mesh, rot: Transportarterien aus grobem Mesh)

Das in Abbildung 11 dargestellte Konzept zeigt, wie mittels vier ‚Blättern‘ das Natrium von der Außenwand abgenommen wird und über den Klöpperboden des Innenrohrs verteilt wird. Um einen Vorratsspeicher auf dem Innenrohr zu erhalten und eine gleichmäßige Verteilung des Natriums zu gewährleisten, steht das Mesh über den Klöpperboden hinaus. Der Topf kann somit Natrium gefüllt werden, das anschließend in das Mesh fließt. Um hierbei eine gleichmäßige Verteilung vertikal sowie radial zu erreichen, gibt es zwischen den Lagen von feinem Mesh vertikale Streifen größeren Meshs, die als Transportkanäle fungieren und das Natrium auf unterschiedlichen Höhen in das feine Mesh abgeben.

Untersuchungen an der Thermogravimetrischen Analyse (TGA)

Ein Kernproblem bei Carbonatspeichern ist die oft nur geringe Zyklenstabilität. Das Carbonat (CaCO_3) wird mit jedem Ladevorgang zu gebranntem Kalk (CaO) calzinert und beim Entladen durch Zugabe von mit CO_2 wieder carboniert. Durch die stetigen Zyklen sinkt die Aufnahmefähigkeit des CaO und damit die Wärmekapazität des Speichers. Daher gilt es die Kapazität des verwendeten Kalksteins, beispielsweise durch eine geeignete Vorbehandlung, für den Dauerbetrieb zu optimieren.

Zur Charakterisierung optimaler Prozessbedingungen für die Energiespeicherung mit Carbonaten wurde die Zyklenstabilität zweier Karbonate der Firma Lhoist Rhein Kalk Germany mit Partikelgrößen von 0,1- 0,5 mm mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) analysiert. Hierbei wurden der Temperaturbereich von 800°C bis 900°C und CO_2 -Partialdrücke von 0-1 bar_a (in Stickstoff) untersucht. Das prinzipielle zyklische Verhalten nach den Ansätzen von Grasa [4] und Abanades [5] konnte für unbehandelte Proben nachgewiesen werden, für kleine Zykluszahlen sogar mit einem verbesserten Outcome des Karbonierungsumsatzes. Durch Messungen mit verschiedenen Partikelgrößen konnte ab dem vierten bis fünften Zyklus ein verbesserter Umsatz von kleineren gegenüber größeren Partikelgrößen festgestellt werden. Für die ersten drei bis vier Zyklen ist umgekehrtes Verhalten vorzufinden. Eine Veränderung des p_{CO_2} hat zeigte keinen Einfluss auf die Zyklenstabilität, jedoch auf die Reaktionsrate. Besonders bei der Karbonierung machte sich eine bereits geringe Veränderung des CO_2 -Partialdruckes stark bemerkbar. Ein positiver Effekt durch thermische Vorbehandlung konnte nur für längere Verweilzeiten bei 900°C festgestellt werden (Abbildung 12). Ein selbstheilender Effekt durch Vorsintern bei hohen Temperaturen (>1000°C) konnte nicht bestätigt werden, auch eine Vorbehandlung mit Wasser hatte keinen Einfluss. Untersuchungen mit Zugabe von Wasserdampf während der Kalzinierung konnten noch nicht durchgeführt werden, da die verwendete Messtechnik dafür noch aufgerüstet werden muss.

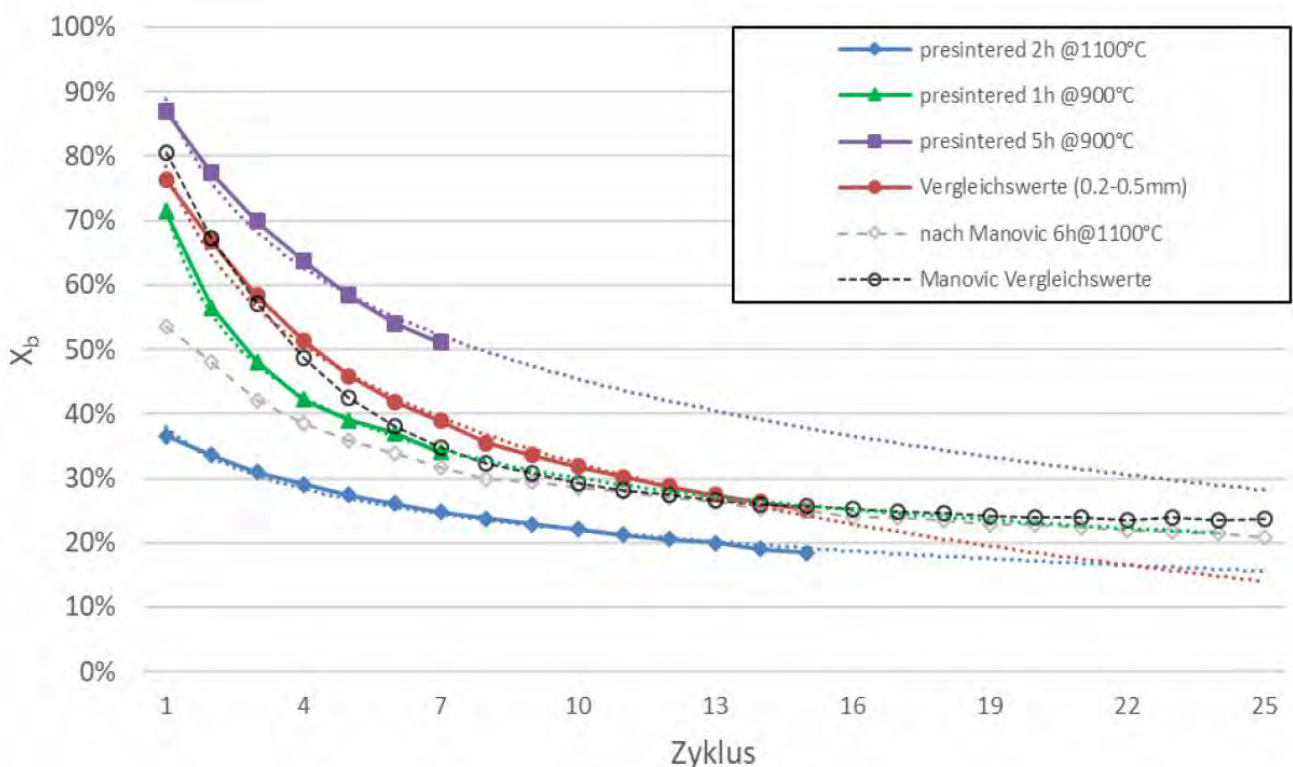


Abbildung 12: Messergebnisse thermisch vorbehandelter Proben im Vergleich zu einer Messung mit unbehandeltem CaCO_3 sowie unbehandeltem und für 6h bei 1100°C vorgesintertem CaCO_3 aus der Arbeit von Manovic et al. [6]

Für eine isotherme Prozessführung des Speichers im Wechsel zwischen Karbonierung und Kalzinierung wurde eine Temperatur von 845 °C ermittelt, bei der die Reaktionsdauern für eine vollständige Kalzinierung ($p_{\text{CO}_2} = 0 \text{ atm}$) bzw. eine vollständige Karbonierung ($p_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$) in gleich lang sind. Mit diesen für die TGA optimierten Prozessbedingungen sollen auch in der Pilotanlage erste Experimente erfolgen. Allerdings wird insbesondere bei der Karbonierung mit starken Abweichungen gerechnet, da bereits kleine Temperatur- und Partialdruckveränderungen im Reaktorverlauf einen großen Einfluss haben.

Aufbau der Pilotanlage und Kooperation mit den Projektpartnern

Um das technische Risiko für den großen Carbonatspeicher (Pilotanlage) zu minimieren, wurde beschlossen erst das Heatpipe-Dampferzeuger Konzept sowie die Integration der SiC-Beheizung mit dem Heatpipe-Konzept zu optimieren (s.o.). Dadurch und durch verzögerte gebäudetechnische Umbaumaßnahmen am Speicherhaus, die aktuell noch laufen, verzögerte sich die Planung des Carbonatspeichers. Der Aufbau soll 2019 beginnen.

In Kooperation mit dem ZAE/iMEET wird zusätzlich der Aufbau eines kleinen Carbonatspeicherreaktors mit einer einzelnen Heatpipe geplant, an dem nur die optischen Untersuchungen durchgeführt werden sollen, da dies bessere Möglichkeiten für reproduzierbare Ergebnisse bietet. Dieser Carbonatspeicher ist aktuell in der Planung in Absprache zwischen den Projektpartnern und soll am EVT aufgebaut werden. Die entsprechende Messtechnik wird vom ZAE/i-MEET konzipiert.

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

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

Zur besseren und effektiveren Nutzung der Hochtemperaturcarbonatspeicher sollen in diesem Teilprojekt die Wärmeflüsse beim Be- und Entladen des Speichers in Form von Wärme gemessen werden. Als Messmethoden werden hierbei die Phosphorthermometrie als auch die Infrarot(IR)-Thermometrie eingesetzt, mit denen die lokalen Temperaturverteilungen bei den hohen Betriebstemperaturen (800 °C - 900 °C) des Speichers bestimmt werden. Im

Projektjahr 2018 wurden die Vorversuche zur Thermometrie an Festbetten weitergeführt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben werden.

Phosphorthermometrie an Carbonat-Phosphor-Mischung

Bei der Phosphorthermometrie wird ein Leuchtstoff (im Folgenden auch *Phosphor* genannt) mit einem Laser angeregt und dessen Lumineszenzspektrum aufgenommen und ausgewertet. Da sich dieses Spektrum mit der Temperatur charakteristisch ändert kann es zur Temperaturmessung verwendet werden. Durch die Verwendung von Leuchtstoffen, die im sichtbaren Wellenlängenbereich angeregt werden und leuchten (lumineszieren), wird die Messung nicht von der Wärmestrahlung im Hochtemperaturspeicher beeinflusst.

Da in späteren Versuchen der Leuchtstoff zusammen mit dem Granulat des Carbonats im Speicher zur Temperaturmessung zum Einsatz kommen und der Anteil des Phosphors möglichst gering gehalten werden soll, wurden Pulvermischungen beider Stoffe mit unterschiedlichen Massenanteilen hergestellt. Als Phosphor wurde ein mit Dysprosium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall (Dy:YAG) verwendet. Es zeigte sich, dass mit geringerem Phosphoranteil die Intensität des Emissionspektrums sank, dies aber durch eine längere Integrationszeit des Spektrometers ausgeglichen werden kann. Somit ist der sehr geringe Einsatz von Phosphor im Speicher theoretisch möglich. *Abbildung 13* zeigt die Spektren der Phosphorthermometriemessungen mit 20 % Massenanteil des Phosphors und eine Integrationszeit des Spektrometers von 400 ms bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Intensitätsabnahme bei höheren Temperaturen ist zwischen 470 nm und 500 nm deutlich zu sehen. Für die Temperaturreferenzkurve der Phosphorthermometrie wird die Intensität um den Wellenlängenbereich bei 450 nm zur zuvor genannten in Relation gesetzt, um unabhängig von der absolut gemessenen Intensität einer bestimmten Wellenlänge die korrekte Temperatur zu messen. Ansonsten würden die Messungen bei Schwankungen der Phosphorkonzentration im Speicher zu falschen Temperaturergebnissen führen.

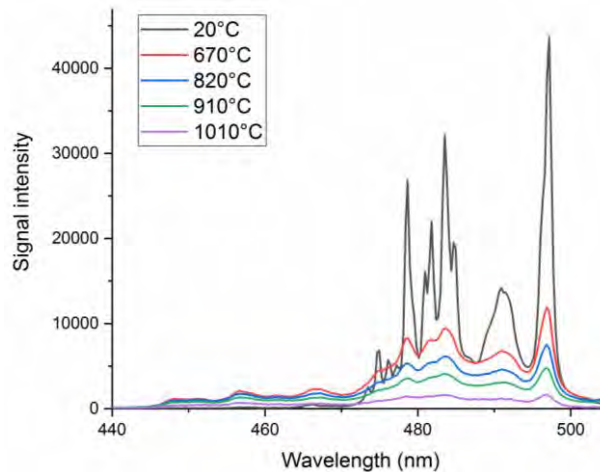


Abbildung 13: Lumineszenzspektren der Phosphorthermometrie von Pulvermischung bestehend aus Dy:YAG (= Leuchtstoff) und Carbonat (Massenanteile 1:4) bei verschiedenen Temperaturen

IR-Thermometrie an Carbonatgranulat

In einem neuen Versuchsaufbau mit vertikalem Rohrofen können bei den Phosphor- und IR-Thermometriemessungen die Oberflächentemperatur mit einem Thermoelement abgeglichen und verifiziert werden. Hierbei wird das Thermoelement von unten durch einen Tiegel mit der Granulatprobe bis zu dessen Oberfläche geschoben, wodurch sich keine Abschattungseffekte einstellen und das Thermoelement im Granulat oder an der Granulatoberfläche genau positioniert werden kann. Des Weiteren ist der Versuchsaufbau so konzipiert, dass alle drei Thermometriemethoden gleichzeitig durchgeführt werden können.

IR-Thermometriemessungen am Carbonatgranulat wurden zunächst mit einer Wärmebildkamera mit Bolometerdetektor (Absorptionsbereich = $7,5\ \mu\text{m}$ - $14\ \mu\text{m}$) durchgeführt. Hierbei erwies sich die Einstellung des Oberflächenemissionskoeffizienten des Granulats sowie die Berücksichtigung der Reflektivität des Spiegels in der

Versuchsanwendung als essentiell, um die Oberflächentemperatur des Granulats über einen weiten Temperaturbereich mit geringem Fehler zu messen. Die Ergebnisse der Messung ergaben eine lineare Zunahme der Abweichung von 12 K bei einer Temperaturspanne von 500 - 900 K. Die Ergebnisse sind mit einer Abweichung von weniger als ± 4 K gut reproduzierbar. IR-Kameras mit anderen Detektoren werden künftig auf ihre Einsatzfähigkeit getestet und bewertet.

Untersuchung der mit Dy³⁺ dotierten thermographischen Leuchtstoffe

Während des Berichtszeitraums wurde ebenfalls die Entwicklung von drei Klassen von Dy³⁺-basierten Leuchtstoffen fortgesetzt, die eine Hochtemperatur-Thermometrie sowohl nach der Intensitätsverhältnismethode als auch nach temperaturabhängiger Lumineszenzlebensdauer ermöglichen.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) wurden als Feststoffe synthetisierte (Gd,Lu)₃Al₅O₁₂:Dy³⁺ (Granat, GAG) und (Gd,Lu) AlO₃: Dy³⁺ (Perowskit, GAP) -Pulver als Alternativen zu YAG: Dy³⁺ untersucht, das eine relativ geringe Photolumineszenz-Quanteneffizienz hat. In diesen Materialien werden die Dy³⁺-Ionen durch Energieübertragung von den Gd-Gitterionen angeregt und die Quanteneffizienz ist höher als in Y₃Al₅O₁₂ (YAG) und YAlO₃ (YAP). Die Stabilisierung des Gitters und die weitere Verbesserung der Quanteneffizienz wurden durch partielle Substitution von Gd- durch Lu-Ionen sowohl in GAG als auch in GAP erreicht. Der verfügbare Temperaturbereich für das Intensitätsverhältnisverfahren betrug bis zu 1000 K in GAP und 1600 K in GAG.

Die Optimierung der Syntheseparameter von Y₂SiO₅: Dy³⁺ (ermöglicht Intensitätsverhältnismessungen bis zu 1500 K), einschließlich der Dotierungskonzentration von Dy³⁺, und der Menge des LiF-Flusses, das die Kristallmorphologie verbessert, wurde abgeschlossen und die Ergebnisse veröffentlicht.

Das neue granatartige thermografische Material Ca₃Sc₂Si₃O₁₂:Dy³⁺ wurde mittels eines durch Fettsäure unterstützten Co-Präzipitationsverfahrens synthetisiert, wobei die Partikelgröße, der Dotierungsgrad und die Temperatur der Wärmebehandlung variiert wurden. Wir waren in der Lage, Partikel von 200 bis 500 nm mit einem Dy-Dotierungsgrad von bis zu 0,2% herzustellen, ohne dass dadurch die Lumineszenzeigenschaft oder die Partikeloberfläche nachteilig beeinflusst wird. Obwohl das Intensitätsverhältnis und die Temperaturempfindlichkeit der Nanopartikel niedriger sind als bei qualitativ hochwertigen einkristallinen Filmen, kann der Leuchtstoff für Temperaturmessungen bis zu 1500 K verwendet werden [2]. Der Effekt des Co-Dopings des Materials mit Ce³⁺ wurde in Zusammenarbeit mit dem Physikalischen Institut der Kasimierz-Wielki-Universität in Bydgoszcz untersucht.

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

Jan Sebastian Hildebrand, Wolfgang Krcmar (THN)

Einleitung

In diesem Teilprojekt wird die Eignung geometrisch optimierter Werkstoffproben zur sensiblen Speicherung von thermischer Energie geprüft, mit dem Ziel, Kenngrößen für die Auslegung eines Dampferzeugers zu entwickeln, der zum Vorwärmen von Speisewasser im Dampfkraftwerk sowie zur Einspeisung von Dampf in ein Fernwärmenetz dient.

Thermoschock-Prüfung mittels Wasserabschreck-Versuch

Die Abschreckversuche mit Wasser erfolgten in Anlehnung an die Norm DIN EN 820-3. Dazu wurden Werkstoffproben, in diesem Fall Ziegelkeramik und Cordierit, zunächst im Trockenschrank bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Danach wurden die Proben in einem Kammerofen auf Zieltemperatur, z.B. 100, 400 oder 600 °C, erhitzt und diese über einen Zeitraum von 1 h konstant gehalten, so dass die Kerntemperatur der Proben der Temperatur im Ofenraum entsprach. Danach wurden die heißen Werkstoffproben innerhalb eines Zeitfensters von 0,5 Sekunden in einem kalten Wasserbad mit einer Temperatur von 20 °C (+/- 2 °C) schockartig abgekühlt. Das Wasserbad darf sich bei dieser Wärmeübertragung um nicht mehr als 5 °C erwärmen, was durch ein ausreichend großes Wasservolumen zu gewährleisten ist. Anschließend wurden die Proben erneut bei 105 °C getrocknet, auf Raumtemperatur abgekühlt und der keramischen Charakterisierung zugeführt, u.a. der 3-Punkt-Biegezug-Festigkeit und der Porengrößenverteilung.

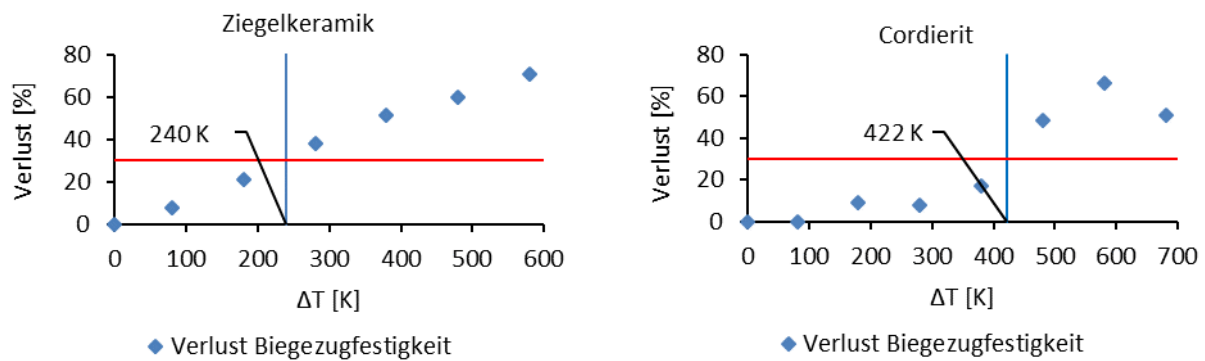


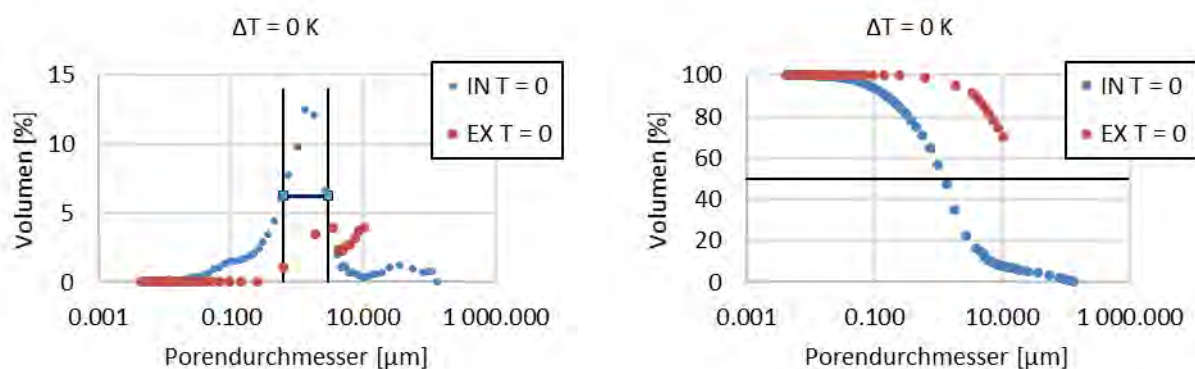
Abbildung 14: Bestimmung der kritischen Temperaturdifferenzen von Ziegelkeramik und Cordierit für die werkstoffliche Kenngröße Biegezug-Festigkeit.

3-Punkt-Biegezug-Festigkeit

Ein mittlerer Abfall der gemessenen 3-Punkt-Biegezug-Festigkeit von über 30 %, im Vergleich zur Null-Probe, wird als Materialversagen gewertet. Die Temperaturdifferenz ΔT , bei der exakt ein mittlerer Abfall der 3-Punkt-Biegezug-Festigkeit um 30 % eintritt, gilt als kritische Temperaturdifferenz ΔT_{krit} . Abbildung 14 zeigt die Abnahme der Biegezug-Festigkeit bei steigender Temperaturdifferenz für Ziegelkeramik sowie Cordierit. Daraus geht hervor, dass die hier eingesetzte Ziegelkeramik eine kritische Temperaturdifferenz von $\Delta T_{krit} = 240$ K aufweist. Im Falle der verwendeten Cordierit-Keramik beträgt die kritische Temperaturdifferenz $\Delta T_{krit} = 422$ K.

Porengrößenverteilung

Die bei Temperaturdifferenzen ΔT von 380 K, 480 K und 580 K abgeschreckten Ziegelproben sowie die zugehörigen Null-Proben (bei $\Delta T = 0$ K) wurden bei einer Temperatur von 105 °C rückgetrocknet. Anschließend erfolgte die Untersuchung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberporosimeter. Tabelle 1 zeigt das in die Poren der Ziegelkeramik intrudierte Quecksilber-Differenzvolumen, den X_{50} -Wert und die Halbwertsbreite HWB der Poren. Im Porenbereich zwischen 4 nm und 50 nm steigt zwischen den Temperaturdifferenzen $\Delta T = 380$ K und $\Delta T = 480$ K das intrudierte Differenzvolumen des Quecksilbers deutlich an; das Porenvolumen hat sich in diesem Porendurchmesser-Bereich erhöht (Abbildung 15).



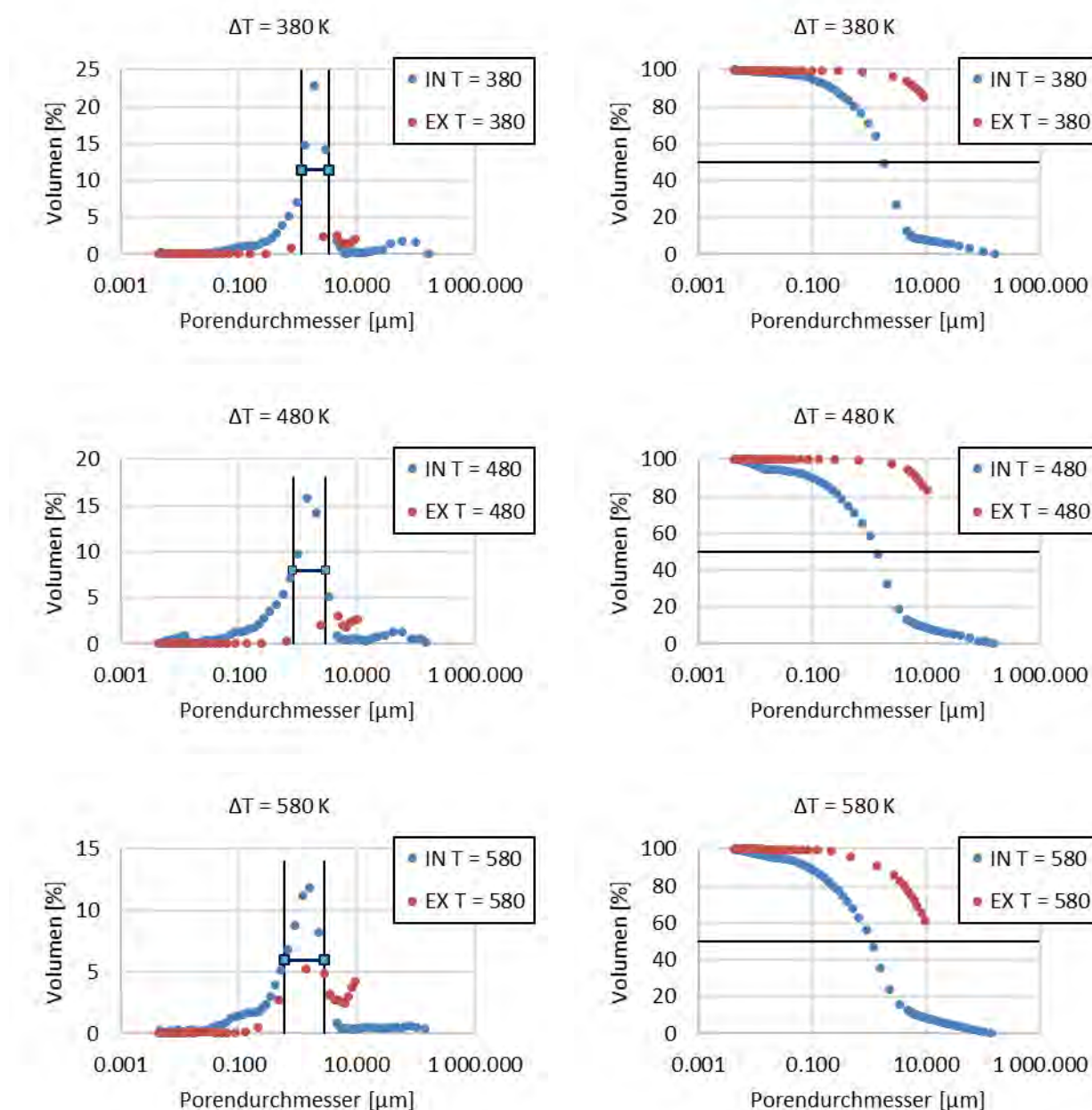


Abbildung 15: Dichteverteilung (links) und Summenverteilung (rechts) der Porengrößen der abgeschreckten Ziegelkeramik im Vergleich mit nicht abgeschreckter Ziegel-Null-Probe.

Die Zunahme der Porenanzahl im Mesoporen-Bereich (Bereich des Porendurchmessers von 2 nm bis 50 nm) zeigt sich in einer kleinen Ausbeulung des Kurvenverlaufs sowohl in der Dichteverteilung als auch in der Summenverteilung im betrachteten Porendurchmesser-Gebiet (Abbildung 15).

Tabelle 1: Intrudiertes Differenzvolumen und Halbwertsbreite der abgeschreckten Ziegelkeramik.

Messgröße/Temperaturdifferenz	$\Delta T = 0 \text{ K}$ (Null-Probe)	$\Delta T = 380 \text{ K}$	$\Delta T = 480 \text{ K}$	$\Delta T = 580 \text{ K}$
ΔV (4 bis 50 nm) [Vol.-%]	2,62	2,98	7,30	7,41
x_{50} [μm]	1,258	1,274	1,364	1,092
HWB Δx [μm]	2,378	2,137	2,121	2,220

Als mögliche Ursache für die Zunahme der Porenanzahl kommt die Bildung feiner Risse durch die beim Abschrecken induzierte Thermospannung in Frage. Durch die Rissbildung werden möglicherweise geschlossene Poren in der Ziegel-Matrix für die Quecksilberintrusion zugänglich gemacht. Mit der künftigen Durchführung von REM-Analysen soll versucht werden, die Rissbildung aufzuklären. Die Halbwertsbreite (HWB) variiert nur geringfügig in Korrelation zur Temperaturdifferenz beim Abschrecken, d.h. der maßgebliche Anteil am gesamten Porenvolumen verschiebt sich durch den Thermoschock nicht zu einem anderen Porendurchmesser-Bereich.

Vorversuche zur Zyklusstabilität von Ziegelkeramik

Eine Charakterisierung der Zyklusstabilität von Ziegelkeramik erfolgte mit Hilfe der simultanen thermischen Analyse (STA). Dazu wurde die Ziegelkeramik pulverfein gemahlen und anschließend unter ständiger synthetischer Luft-Atmosphäre (80 Vol.-% N₂, 20 Vol.-% O₂) zwischen den Temperaturen 120 °C und 750 °C über fünf Zyklen N hinweg bei jeweils definierter Aufheiz- und Abkühlrate von 40 K/min erhitzt bzw. abgekühlt, wobei jede Zieltemperatur für jeweils 60 min gehalten wurde. Über die DSC-Funktion (Dynamische Differenzkalorimetrie) wurden dabei die pro Zyklus ein- und ausgespeicherten Wärmeenergien gewichtsspezifisch gemessen (Abbildung 16).

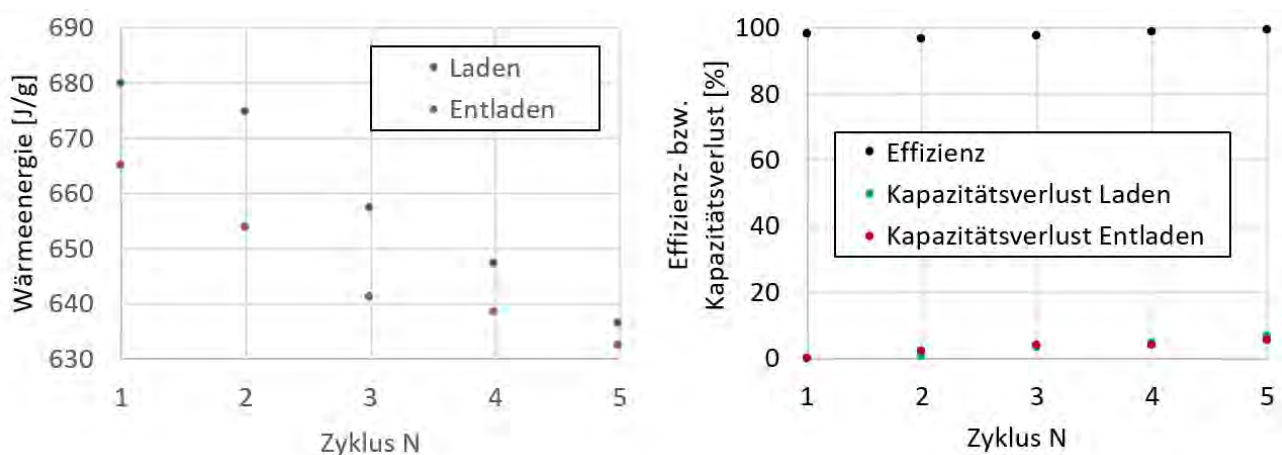


Abbildung 16: In Ziegelkeramik ein- und ausgespeicherte Wärmeenergie (links) bzw. Effizienz- und Kapazitätsverlust beim Laden und Entladen (rechts) in Abhängigkeit von der Zykluszahl N.

Das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Energie wird dabei, angelehnt an die Charakterisierung von Batterien als Effizienz bezeichnet. Der Kapazitätsverlust über alle fünf Ladevorgänge beträgt dabei 6,4 %, der Kapazitätsverlust über sämtliche Entladevorgänge beträgt 4,9 % (Abbildung 16).

Konstruktion eines Prüfofens zur reproduzierbaren Charakterisierung der Zyklusstabilität der Speicherwerkstoffe

Um die Zyklusstabilität der Speicher-Werkstoffe messtechnisch ermitteln zu können, erfolgte die Planung und Konstruktion eines entsprechenden Prüfofens im Technikum-Maßstab. Ziel ist die messbare und reproduzierbare dynamische Ein- und Ausspeicherung von thermischer Energie in die Speicher-Werkstoffe. Der Prüfofen besteht u.a. aus einem Druckbehälter in dem die Speichermassen (Werkstoffe) für die Ein- und Ausspeicherung von thermischer Energie zyklisch beansprucht werden. Dafür werden die Speichermassen mit einer elektrischen Strahlungsheizung auf bis zu 750 °C erhitzt und anschließend mit fein zerstäubtem VE-Wasser aus einer regelbaren Düse unter Direktdampferzeugung wieder abgekühlt. Tabelle 2 zeigt die technischen Eigenschaften der neuen Ofenanlage.

Tabelle 2: Technische Eigenschaften des geplanten Prüfofens.

Komponente	Spezifikation
Elektrische Strahlungsheizung	Leistung: 30 kW
Dosierpumpe	Volumenstrom: 1 – 16 ml/s
4-Kanal-Schreiber	3 x Temperatur, 1 x Druck
Speisewasserbehälter	Volumen: 180 l
Kondensatbehälter	Volumen: 30 l
Auslassdruckventil	Druck: 2 bar
Prüfbehälter	Maximaler Druck: 2,5 bar Überdruck

Ab einem Auslassdruck von 2 bar wird der beim Abkühlen erzeugte Wasserdampf über ein Dampfauflass-Ventil in die Abluft überführt. Im Prüfraum kondensierter Wasserdampf kann mittels Kugelhahn in einem Kondensatbehälter gesammelt werden. Während der zyklischen Aufheiz- und Abkühlvorgänge messen Temperaturfühler die Temperatur der Elektroheizung, die Prüfraumtemperatur und die Proben temperatur. Ein Drucksensor misst gleichzeitig den Druck im Prüfraum. Alle aufgenommenen Messdaten werden an eine interne Gerätesoftware übertragen und können zur Auswertung über eine Schnittstelle auf einen PC übertragen werden.

Die Prüfanlage wurde gebaut und befindet sich im Probebetrieb.

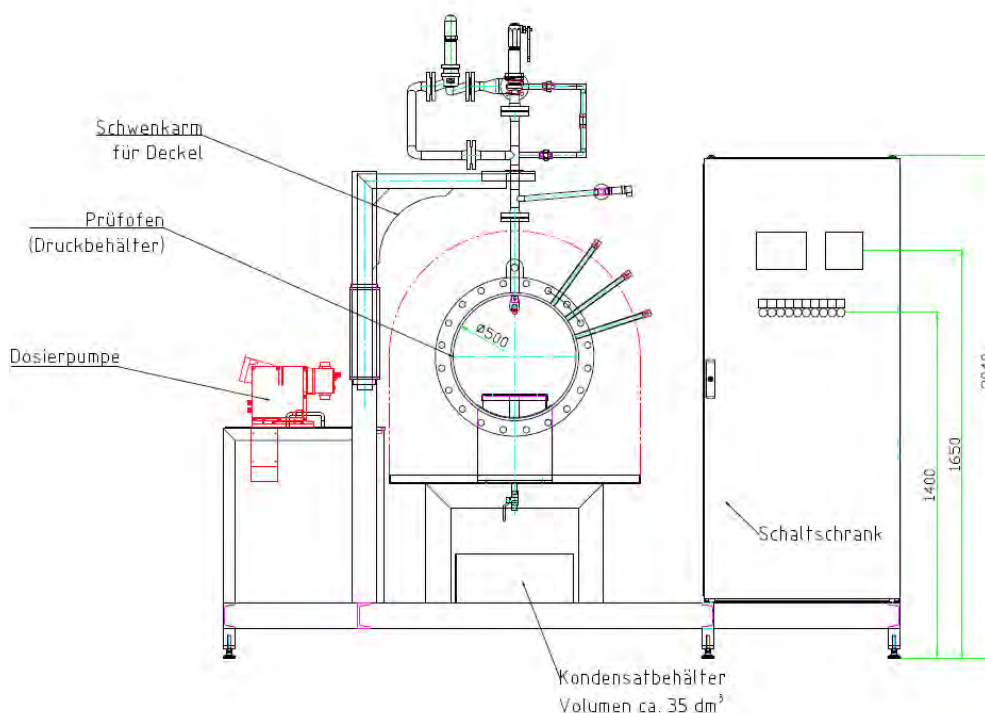


Abbildung 17: Technische Zeichnung der Prüfanlage zur experimentellen Bestimmung der Zyklenstabilität der Speicherwerkstoffe.

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

4.1 Reaktorkonzept für dynamische Methanisierung

Michael Neubert, Jürgen Karl (EVT)

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik wurde ein neues Reaktorkonzept entwickelt, das sich für die Kühlung von stark exothermen Synthesen eignet. Den Kern des neuen Konzeptes stellen ‚heat pipes‘ (dt. Wärmerohre) dar, die sehr hohe lokale Wärmestromdichten für die in-situ Kühlung erlauben. Das grundsätzliche Konzept, sowie die Ausführung als 5 kW Prototyp wurden bereits im Jahresbericht von 2017 vorgestellt. Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse aus Versuchsreihen mit dem 5 kW Reaktor zur katalytischen Methanisierung vorgestellt und diskutiert. Die berichteten Ergebnisse führten auch zu einer peer-review Veröffentlichung im Journal ‚Applied Energy‘ [7].

Ziel der Entwicklung und der durchgeführten Experimente war der Nachweis, dass mit dem Reaktorkonzept auch im dynamischen Anlagenbetrieb synthetisches „Erdgas“ gebildet wird, dessen Gasqualität den Anforderungen einer Einspeisung ins Gasnetz genügt. Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass die lokalen Temperaturen in der Katalysatorschüttung des Reaktors die maximal zulässigen Temperaturen nicht überschreiten.

Die folgende Tabelle 3 listet die Betriebsbedingungen und die wichtigsten Resultate für die durchgeführten Ergebnisse auf. Dabei wurde der neue Reaktor als erste Reaktionsstufe in ein zweistufiges Methanisierungskonzept mit zwischengeschalteter Wasserabtrennung integriert. Ein konventioneller Festbettreaktor stellt die zweite Reaktionsstufe dar. Alle Experimente mit Ausnahme von OP VIII wurden mit einem stöchiometrischen H_2/CO_2 Gemisch ohne zusätzliches Inertgas durchgeführt. Damit ergaben sich maximal anspruchsvolle Bedingungen. Somit war sichergestellt, dass das Reaktorkonzept auch im Falle von anderen, weniger anspruchsvollen Bedingungen funktioniert.

Tabelle 3: Betriebsbedingungen und Ergebnisse der durchgeführten Experimente mit dem 5 kW Laborreaktor

	Eintritt			1 st Stufe (heat pipe gekühlter Reaktor)							Finales SNG	
	$\dot{V}_{\text{educt,dry}}$ [NI/min]	x_{steam} [vol.-%]	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	T_{max} [°C]	$T_{\text{preheating}}$ [°C]	T_{HP} [°C]	X_{H_2} [%]	Y_{CH_4,CO_2} [%]	P_{el} [W]	H_I [MJ/Nm ³]	$W_{u,n}$ [kWh/m ³]
OP I	20	0.0	30	195	553	277	247	88	88	20	34.9	14.4
OP II	20	10.0	200	210	492	285	273	85	85	90	34.8	14.5
OP III	27	3.9	125	211	525	296	271	86	86	0	34.9	14.7
OP IV	20	5.2	120	207	530	295	265	87	87	106	34.8	14.6
OP V	20	10.0	121	207	503	290	262	85	85	132	34.7	14.6
OP VI	20	11.5	121	209	491	289	261	83	83	139	34.9	14.6
OP VII	35	3.9	194	218	548	303	274	85	85	0	34.9	14.7
OP VIII*	34	24.8	191	228	467	296	277	75	84	0	26.6	13.5

* Eintrittsgaszusammensetzung ähnlich zu Annahmen bei Reaktorauslegung

Ziel des neuen Reaktorkonzeptes war es die maximale Synthesetemperatur im katalytischen Festbett eines Reaktors auf maximal 550°C zu begrenzen, damit kein Sintern auftritt. Im Falle eines stöchiometrischen H_2/CO_2 Gemisches bedeutet dies, dass eine in-situ Kühlung die Reaktionswärme abführen muss. Die adiabate Synthesetemperatur liegt um über 100 K über dem zulässigen Katalysatorlimit und hätte sofortige Katalysatordeaktivierung durch Sintern zur Folge. Neben einem in-situ Kühlmechanismus erlaubt auch eine angepasste Reaktionsführung den Temperaturanstieg zu limitieren. Hier bietet sich vor Allem ein gewisser Dampfanteil im Eduktgas an, der sowohl als thermischer Ballast fungiert, als auch das thermodynamische Gleichgewicht zu kleineren Eduktumsätzen verschiebt.

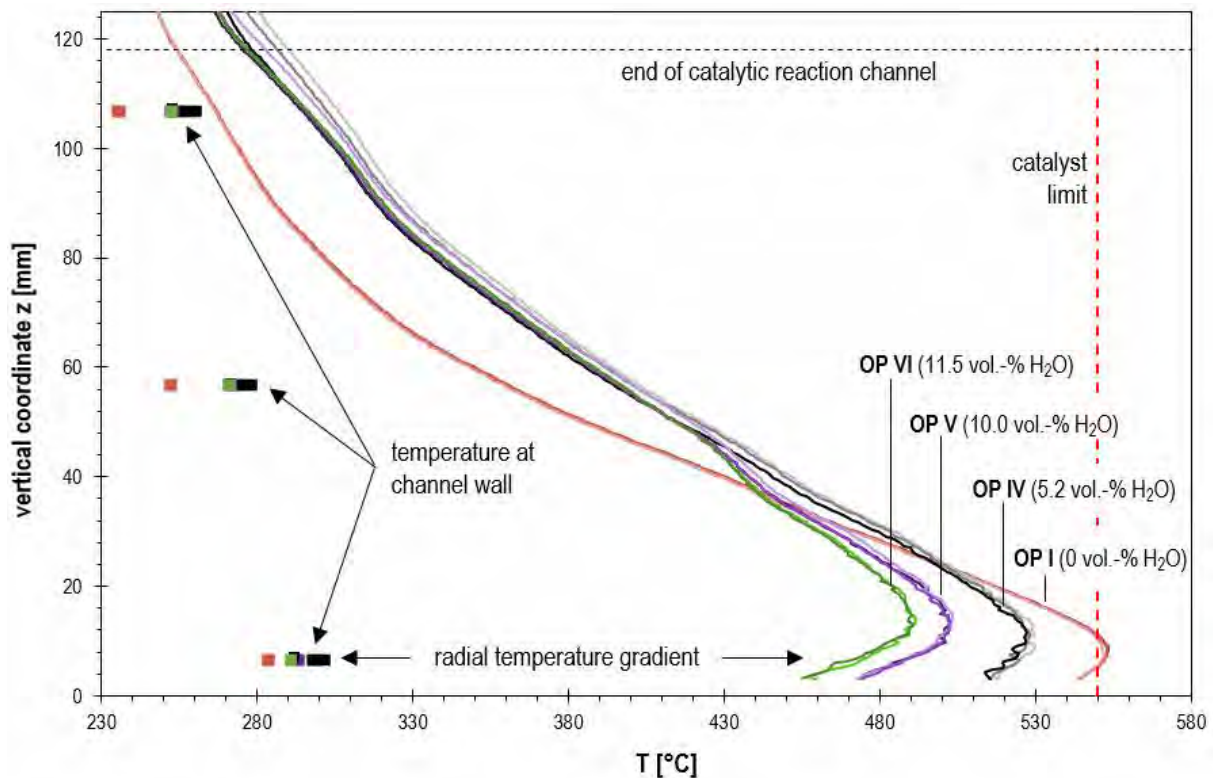


Abbildung 18: Axiales Temperaturprofil (Linie) in Reaktionskanal in der Mitte von Reaktorkörper; Quadrate repräsentieren die Temperatur am Rand eines Reaktionskanals auf drei verschiedenen Höhen; Messungen bei unterschiedlichen Dampfgehalten im Eduktgas; reproduziert aus [7]

Abbildung 18 zeigt das axiale Temperaturprofil (Linien) im Reaktionskanal in der Mitte des Reaktorkörpers, sowie die Temperaturen an der Wand eines Reaktionskanals auf drei verschiedenen Höhen (Quadrate) für vier verschiedene Dampfgehalte. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Falle eines trockenen Eduktgases die maximal zulässige Katalysatortemperatur überschritten wird. Allerdings führt bereits eine Zugabe von 5.2 % Dampf zu einer maximal gemessenen Synthesetemperatur, die unterhalb dem Katalysatorlimit lag. Eine weitere Erhöhung des Dampfgehaltes auf bis zu 11.5 % Dampf führte zu einer weiteren Erniedrigung von ca. 40 K der maximalen Synthesetemperatur. Die gemessenen maximalen Synthesetemperaturen sind außerdem um mehr als 100 K niedriger als die berechnete adiabate Synthesetemperatur (siehe auch [7]), womit die Eignung des Reaktorkonzeptes gezeigt ist. Im Gegensatz zu den Betriebspunkten OP I, IV-VI ist der Volumenstrom vom Eduktgas in OP VII auf 35 Nm^3/min erhöht worden, was dem Auslegungspunkt von 5 kW Eduktgasleistung entspricht. Auch unter diesen verschärften Betriebsbedingungen ist die Kontrolle der maximalen Synthesetemperatur gewährleistet und ist dementsprechend niedriger als 550 °C (Abbildung 19). Ein Vergleich der maximal gemessenen Synthesetemperatur im Zentrum eines Reaktionskanals mit 8 mm Durchmesser und der Temperatur an der Kanalwand eines Reaktionskanals zeigen sehr hohe radiale Temperatur-differenzen von bis zu 250 K. Diese gemessenen Differenzen (aus OP VIII) sind in guter Übereinstimmung mit den berechneten radialen Temperaturprofilen zur Reaktorauslegung (siehe Jahresbericht von 2017).

Die erhaltene Gasqualität ist im Hinblick auf eine mögliche Einspeisung des erzeugten Methans als Substitute Natural Gas (SNG) in das Erdgasnetz von Relevanz. Das DVGW Regelwerk, insbesondere G260, legt hierzu Standards für H-Gas und L-Gas fest. In Abbildung 20 ist die Gasqualität (Brennwert und oberer Wobbe-Index) für die Betriebspunkte OP I-VII jeweils nach der ersten und zweiten Reaktionsstufe dargestellt. Offensichtlich ist die finale Gaszusammensetzung am Austritt der zweiten Reaktionsstufe nahezu konstant für alle Bedingungen, wohingegen sich deutliche Unterschiede am Austritt des neuen Reaktors zeigen. Letztendlich puffert die zweite Stufe aber erniedrigte Umsätze aus der ersten Stufe ab und gewährleistet eine gleichbleibende Gasqualität für deutlich variierende Eintrittsbedingungen. Diese hohe Resilienz des vorgeschlagenen Methanisierungssystems unterstreicht die Eignung für eine mögliche zukünftige Anwendung in Power-to-Gas.

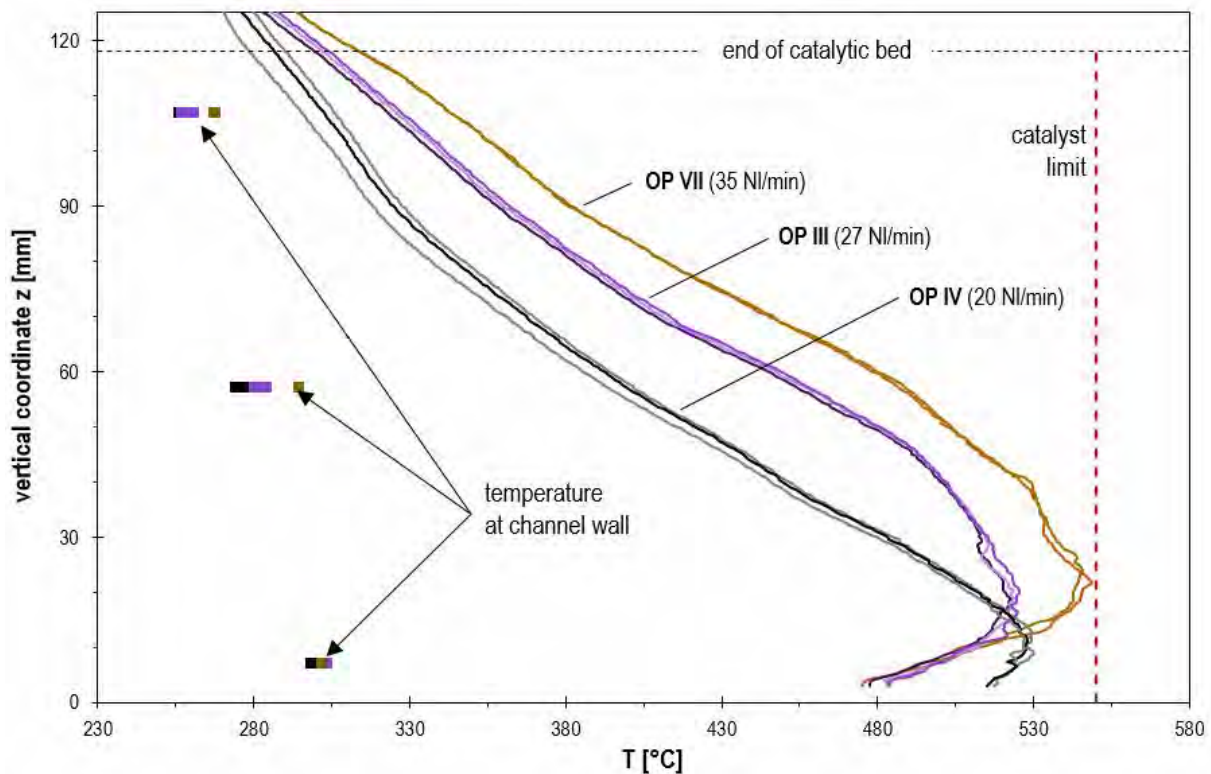


Abbildung 19: Axiales Temperaturprofil (Linie) in Reaktionskanal in der Mitte von Reaktorkörper; Quadrate repräsentieren die Temperatur am Rand eines Reaktionskanals auf drei verschiedenen Höhen; Messungen bei unterschiedlichen Eduktgasströmen; reproduziert aus [7]

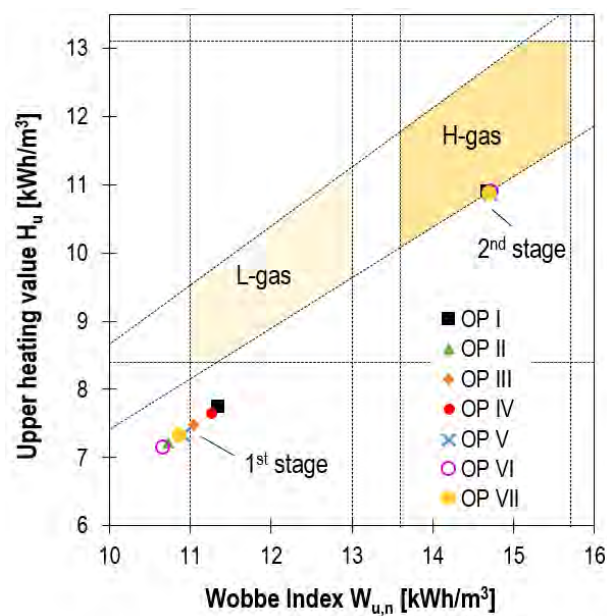


Abbildung 20 Brennwert und oberer Wobbe Index für die gemessenen Gaszusammensetzungen jeweils nach der ersten und zweiten Reaktionsstufe; reproduziert aus [7]

Für eine enge Abstimmung innerhalb des Teilprojekts ‚Speicher A – 3 Dynamische Synthesen‘ fanden quartalsmäßige Treffen mit den Kollegen vom Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) statt. Außerdem wurde der aktuelle Stand der Arbeiten zum neuen Reaktorkonzept auf dem jährlichen Arbeitstreffen der Speicher A Gruppe, sowie der Jahreskonferenz des Energie Campus Nürnberg präsentiert. Des Weiteren erfolgte die Präsentation der durchgeführten Arbeiten auf der ProcessNet Jahresfachtagung ‚Energieverfahrenstechnik‘ im März 2018 in Frankfurt und dem ‚4th Nuremberg Workshop on Methanation and 2nd Generation Fuels‘ im Mai 2018 in Nürnberg.

Im Jahr 2019 erfolgt die Inbetriebnahme eines Scale-Up des neuen Reaktorkonzeptes und daran anschließend die experimentelle Charakterisierung.

Seit Juni 2018 koordiniert der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik das europäische Drittmittelprojekt i³upgrade, welches sich mit der Synthese von Kuppelgasen aus der Stahlproduktion beschäftigt. Im Rahmen dieses Projektes erfolgt die weitere Nutzung des errichteten Reaktorprototyps, sowie eine Weiterentwicklung des Konzeptes für den effizienteren Scale-Up.

4.2 Modellierung des Reaktorkonzeptes im dynamischen Betrieb

Konrad Fischer, Hannsjörg Freund (CRT)

Am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) wird die stationäre und dynamische Methanisierung in Festbettreaktoren mittels numerischer Simulationen untersucht. Dazu wird das am EVT entwickelte Reaktorkonzept mathematisch modelliert. Zielsetzung des Arbeitspaketes ist es, das Reaktorverhalten im Modell darzustellen um darauf aufbauend optimale Betriebsbedingungen abzuleiten. Grundlage für die Modellentwicklung sind experimentelle Messdaten, die von den Projektpartnern am EVT zur Verfügung gestellt werden. Auf Basis der Daten kann die Anwendbarkeit der entwickelten Modellkandidaten geprüft und die Zuverlässigkeit der Modellvorhersagen validiert werden.

Die Symmetrie des Reaktorkonzeptes erlaubt es, den Reaktor durch eine repräsentative Einheitszelle zu beschreiben, in der nur ein einzelner Reaktionskanal modelliert wird. In einem ersten Schritt wurde der Reaktionskanal mittels eines eindimensionalen, quasi-homogenen Reaktormodells und etablierten Korrelationen für den Wärmetransport beschrieben. Ziel der Untersuchung war es, die reaktionskinetischen Modelle von Rönsch et al. [8] und Koschany et al. [9] auf ihre Eignung zu prüfen. Bereits isotherme Simulationen des Reaktors mit beiden Modellen zeigten starke Unterschiede in der Modellvoraussage, speziell in der Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit. Im Rahmen von polytropen Simulationen wurde deutlich, dass beide kinetische Modelle zu schnelle Reaktionsraten beschreiben und das gemessene Verhalten des Reaktors nicht nachgebildet werden kann. Es ist daher wahrscheinlich, dass Wärme- und Stofftransporteinflüsse in den relativen großen Katalysatorpellets die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen. Dies kann durch die Einführung eines Katalysatorwirkungsgrades im Modell berücksichtigt werden. Das Ergebnis zeigte zusätzlich die Grenzen des eindimensionalen Modells auf, da Gradienten in radialer Richtung nicht berücksichtigt werden und damit auch nicht eine radial veränderliche Reaktionsgeschwindigkeit. Das eindimensionale Reaktormodell wurde daher um die radiale Reaktorkoordinate erweitert und ein konstanter Katalysatorwirkungsgrad wurde eingeführt. Durch die Modellerweiterung kann das Reaktorverhalten deutlich besser beschrieben werden. Das zweidimensionale Temperaturprofil zeigt, wie im Experiment gemessen, starke axiale und radiale Gradienten auf (siehe Abbildung 21). Dennoch ist die Modellgenauigkeit noch nicht ausreichend, da die Abweichung zwischen Experiment und Simulation noch zu groß ist. In einem nächsten Schritt soll durch die Modellierung einzelner Katalysatorpartikel der Einfluss von Wärme- und Stofftransport auf die Reaktionsgeschwindigkeit genauer untersucht werden, um den Katalysatorwirkungsgrad exakter bestimmen zu können. Weitere Ansätze für die Modellverbesserung erfolgen in enger Zusammenarbeit mit dem EVT. Hier spielt auch die Genauigkeit der Messdaten bzw. Annahmen bei deren Zuordnung und Interpretation eine entscheidende Rolle, die ebenso stets überprüft werden muss.

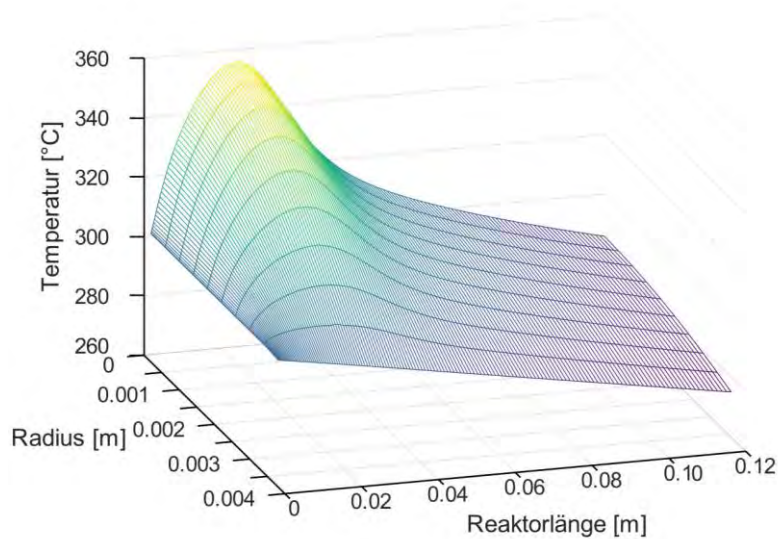


Abbildung 21: Simulierter Temperaturverlauf in axialer und radialer Richtung eines Reaktionskanals des EVT Reaktorkonzepts.

Auf dem identifizierten und validierten Reaktormodell aufbauend soll in einem nächsten Schritt ein dynamisches Reaktormodell entwickelt werden. Dazu wurde in diesem Jahr, parallel zu den Arbeiten am Reaktormodell des EVT Reaktorkonzepts, eine umfangreiche Simulationsstudie durchgeführt mit dem Ziel, das dynamische Verhalten von Festbettreaktoren im Allgemeinen besser zu verstehen. Hier stellte sich auch die Frage, welche Modellkomplexität nötig ist um das dynamische Verhalten eines Festbettreaktors möglichst genau zu beschreiben.

In der Simulationsstudie wurde das dynamische Verhalten eines gekühlten Rohrreaktors im industriellen Maßstab betrachtet. Der Reaktor wurde mit verschiedenen Modellen beschrieben, die sich hinsichtlich ihrer Dimensionalität und der Beschreibung der Phasen unterscheiden. Ausgehend von einem stationären Betriebspunkt wurde der Volumenstrom am Reaktoreingang sprunghaft um 10% geändert, während weitere Eingangsgrößen konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung des Volumenstroms zwangsläufig eine Verringerung des Umsatzes und eine Abkühlung des Reaktors verursacht. Gründe hierfür sind die verringerte Verweilzeit und eine erhöhte Wärmeabfuhr. Ein merklicher Unterschied besteht jedoch in der Modellvoraussage der unterschiedlichen Modellkandidaten. Heterogene Modelle ergeben deutlich längere Zeiten, bis ein neuer stationärer Zustand erreicht wird. Der Grund sind die Wärme- und Stofftransportwiderstände innerhalb der Katalysatorpartikel, die in quasi-homogenen Modellen vernachlässigt werden. Eine sprunghafte Verringerung des Eingangsvolumenstroms resultiert in einem Temperaturanstieg im Reaktor und einen erhöhten Umsatz (siehe Abbildung 22). Durch die höhere Verweilzeit steigt der Umsatz, außerdem ist der konvektive Wärmetransport und die Wärmeabfuhr über die Reaktorwand verringert. Größere Sprungänderungen zeigen einen noch stärkeren und schnelleren Temperaturanstieg. Dies führt dazu, dass ein stabiler Betriebspunkt nicht mehr erreicht wird.

Das Ergebnis der Simulationsstudie verdeutlicht, dass im dynamischen Reaktorbetrieb sowohl Umsatzeinbuße als auch Sicherheitsaspekte entscheidende Herausforderungen darstellen. Ein stabilerer dynamischer Reaktorbetrieb kann durch eine verbesserte Kontrolle weiterer Eingangsgrößen wie der Kühlmitteltemperatur ermöglicht werden. Dazu sind weitere Arbeiten geplant. Die dynamische Simulationsstudie liefert auch wichtige Erkenntnisse für die dynamische Modellierung des EVT Reaktorkonzepts. Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung eines heterogenen Reaktormodells für dynamische Simulationen auf, im Fall, dass die Transportwiderstände im Katalysatorpellet groß sind.

Die Ausgaben am CRT im Rahmen von Teilprojekt 3 AP3 (AK Prof. Freund) betrugen für das Jahr 2018 92.796,17€ bei einer Mittelzuweisung von 88.989,87€ im Jahr 2018.

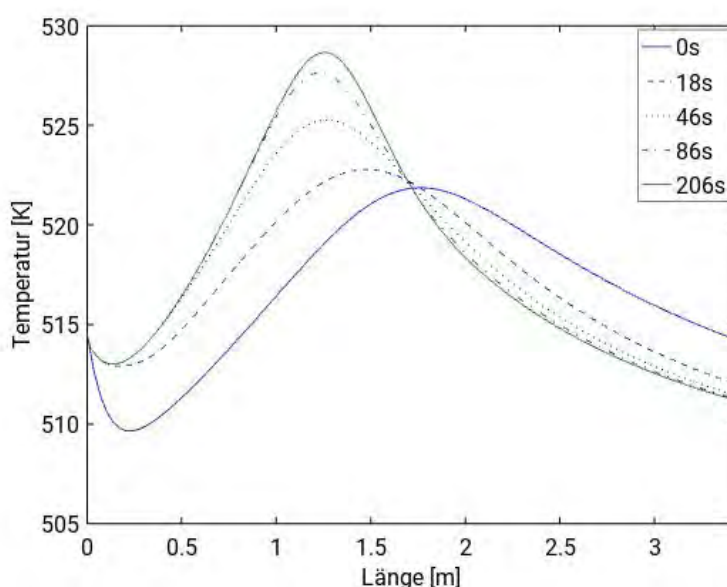
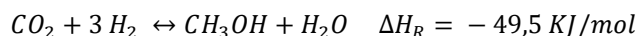


Abbildung 22: Dynamischer Temperaturverlauf eines gekühlten Festbettreaktors bei einer sprunghaften Verringerung des Volumenstroms um zehn Prozent.

4.3 Katalysatorentwicklung für die instationäre Methanolsynthese

Patrick Schühle, Jakob Albert (CRT)

Industriell eingesetzte Katalysatoren, die zur Methanolsynthese aus Kohlenstoffmonoxid eingesetzt werden, zeigen in Anwesenheit von Wasser ein ausgeprägtes Degradationsverhalten. Dies spielt bei der derzeit kommerziell durchgeführten Methanolsynthese aus CO und H₂ normalerweise keine Rolle. Wird jedoch Kohlenstoffdioxid als C-Quelle eingesetzt, entsteht Wasser als Koppelprodukt und führt folglich zur Deaktivierung des industriellen, kupferbasierten Katalysators.



Ein bisher wenig erforschter Katalysator für die Methanolsynthese aus CO₂ basiert auf der Aktivkomponente Indiumoxid (In₂O₃). Für dieses Katalysatorsystem wurde bereits in der Literatur nachgewiesen, dass es sich durch seine Langzeitstabilität (>1000h) und hohe Methanolproduktivität bei der Hydrierung von CO₂ auszeichnet. Im vergangenen Jahr konnten entsprechende In₂O₃-Katalysatoren durch ein optimiertes Nassimprägnierverfahren reproduzierbar hergestellt werden. Dabei wurde die Imprägnierung der In₂O₃-Partikel auf unterschiedlichen Trägern wie ZrO₂, TiO₂ oder CeO₂ erfolgreich durchgeführt. Durch analytische Verfahren wie BET-Sorption, ICP-OES und Ammoniak-TPD konnten die selbst hergestellten Katalysatoren bezüglich ihrer Oberfläche, ihrer Indiumbeladung und ihrer Oberflächenazidität untersucht und miteinander verglichen werden. Dies ermöglichte es, Rückschlüsse auf die Aktivität der Katalysatoren für die Methanolsynthese zu ziehen.

In einer bereits 2017 in Betrieb genommenen 600ml Rührkesselanlage wurden im vergangenen Jahr In₂O₃-basierte Katalysatoren zur Methanolsynthese untersucht. Die Katalysatoren kamen dabei in einem Slurry-Verfahren zum Einsatz, welches sich dadurch auszeichnet, dass der heterogene Feststoffkatalysator in einer Trägerflüssigkeit suspendiert vorliegt. Die gasförmigen Edukte Kohlendioxid und Wasserstoff werden über die Trägerflüssigkeit mit dem Katalysator in Kontakt gebracht. Bei der Verwendung des In₂O₃-Katalysators im Slurry-Verfahren muss beachtet werden, dass externe und interne Stofftransportlimitierungen auftreten können, welche geringere Methanol-Produktivitäten zur Folge haben. Im ersten Schritt müssen die Eduktgase in der Trägerflüssigkeit gelöst und an die äußere Oberfläche transportiert werden (externe Stofftransportlimitierung). Im zweiten Schritt folgt der Transport der Eduktgase durch das innere Porensystem des Katalysators zu den aktiven Zentren auf der inneren Oberfläche (interne Stofftransportlimitierung). Um das gesamte Potential des Katalysators im Slurry-Prozess ausnutzen zu können, müssen Betriebsbedingungen gefunden werden, welche Stofftransportlimitierungen vermeiden. Dazu wurden im vergangenen Jahr Parametervariationen für die Methanolsynthese in der Rührkesselanlage durchgeführt. Durch die Variation der Rührerdrehzahl konnte ein Arbeitsbereich identifiziert werden, welcher externe Stofftransportlimitierungen ausschließt, ohne zu einer

mechanischen Zerstörung der Partikel durch Scherkräfte zu führen (Rührerdrehzahl von 800 rpm). Die Zerkleinerung von Katalysatorpellets auf unterschiedliche Partikelgrößen (56µm, 250µm, 3mm) und deren Einsatz in der Slurry-Methanolsynthese verhinderte außerdem interne Stofftransportlimitierungen (optimaler Partikeldurchmesser <250µm). Weiterhin stand in dieser Parameterstudie der Vergleich unterschiedlicher Trägerflüssigkeiten im Vordergrund. Dabei wurde die Eignung der thermisch stabilen, organischen Verbindungen H18-Dibenzyltoluol, Hexadecan, Tetraethylenglycol und Witco Thermoöl untersucht. Durch die Untersuchung der Trägerflüssigkeiten vor und nach der Reaktion per $^1\text{H-NMR}$ konnte deren chemische und thermische Stabilität während des Prozesses nachgewiesen werden. Auf Grund hoher Methanol-Produktivitäten beim Einsatz von Thermoöl wurde dies als optimale Trägerflüssigkeit für Reaktionstemperaturen < 280°C identifiziert. Vergleichbare Produktivitäten konnten mit H18-DBT als Trägerflüssigkeit erreicht werden, welches zusätzlich den Vorteil eines höheren Siedepunkts bietet und somit für Synthesetemperaturen zwischen 280°C und 350°C geeignet ist. Mit der optimierten Partikelgröße, Rührerdrehzahl und Trägerflüssigkeit wurden im Anschluss makrokinetische Daten für den $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysator im Slurry-Prozess bestimmt. Durch eine Temperaturvariation zwischen 220°C und 280°C ließ sich unter Annahme des Arrhenius-Modells ein linearer Zusammenhang zwischen der reziproken Reaktionstemperatur und der logarithmierten Reaktionskonstante nachweisen (siehe Abbildung 23: Arrhenius-Auftragung zur Bestimmung der effektiven Aktivierungsenergie und des Stoßfaktors der Methanolsynthese im Slurryprozess mit einem $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysator ($p=75$ bar, $d_{\text{kat}}=0,25$ mm, Witco-Thermoöl, $\text{H}_2/\text{CO}_2=3:1$, $w_{\text{In}}=6,1$ %, $m_{\text{kat}}=2$ g, $t=3$ h)). Daraus wurde ein effektiver Stoßfaktor von $2,14 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$ und eine effektive Aktivierungsenergie von 32 kJ mol^{-1} berechnet. Mit den Kenntnissen über die optimalen Prozessparameter und über die kinetischen Daten können im folgenden Jahr auf unterschiedliche Verfahren hergestellte und verschieden strukturierte In_2O_3 -basierte Katalysatoren miteinander verglichen werden.

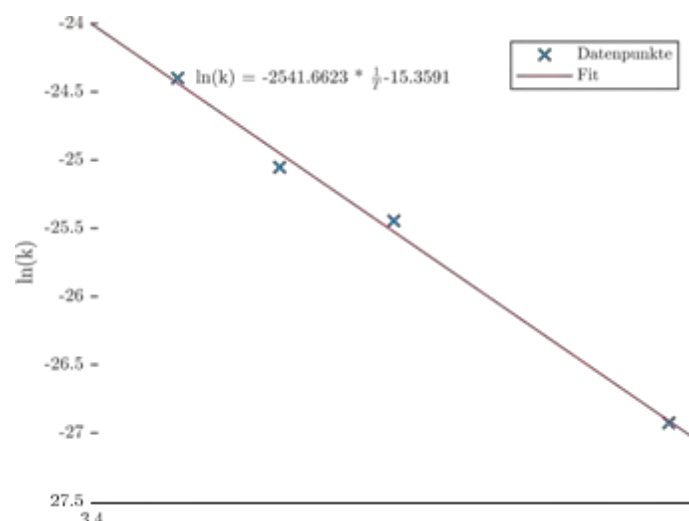


Abbildung 23: Arrhenius-Auftragung zur Bestimmung der effektiven Aktivierungsenergie u. des Stoßfaktors der Methanolsynthese im Slurryprozess mit einem $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Katalysator ($p=75$ bar, $d_{\text{kat}}=0,25$ mm, Witco-Thermoöl, $\text{H}_2/\text{CO}_2=3:1$, $w_{\text{In}}=6,1$ %, $m_{\text{kat}}=2$ g, $t=3$ h).

Um den neuartigen In_2O_3 -basierten Katalysator für ein möglichst breites verfahrenstechnisches Anwendungsgebiet im Rahmen der Methanolsynthese zu untersuchen, wurde im Jahr 2018 eine zweite reaktionstechnische Anlage aufgebaut und in Betrieb genommen (siehe Abbildung 24). Dabei handelt es sich um einen kontinuierlich zu betreibenden Festbettreaktor mit Online-Gaschromatograph zur Prozessanalyse. Der Festbettreaktor konnte im vergangenen Jahr bereits bezüglich anlagenspezifischer Kennzahlen wie Verweilzeitverhalten und Druckverlust durch die Katalysatorschüttung charakterisiert werden. Außerdem zeigten erste Experimente mit einem kommerziellen $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Katalysator, dass die Methanolsynthese in der neuen Anlage robust und reproduzierbar durchgeführt werden kann. Im kommenden Jahr sollen in der neuen Gasphasenanlage In_2O_3 -basierte Katalysatoren eingesetzt werden. Deren Potential für die Methanolsynthese aus CO_2 soll dabei mit einem kommerziellen $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ verglichen werden.



Abbildung 24: In Betrieb genommene Gasphasenanlage zur kontinuierlichen Methanolsynthese.

Für die Tätigkeiten im Rahmen von Teilprojekt 3 im Projektteil Speicher A fielen am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT, Prof. Wasserscheid) 102493,30 € an Ausgaben an.

5 Schlussworte

Neben der fachlichen Arbeit an den einzelnen Instituten wurde seitens des Teilprojektsleiters ein verstärkter Austausch zwischen den einzelnen Forschergruppen gezielt auch innerhalb des Teilprojekts forciert. Erste Erfolge sind vor allem die neu eingeworbenen Drittmittel des BMWi-Projekts FuelBand2 und dem in 2018 begonnenen EU-Projekts „i3upgrade“, in dem Nutzung von Stahlgasen als Kohlenstoffquelle für die dynamische Methan- und Methanolsynthese untersucht werden. Aktuell sind weitere interdisziplinäre Anträge für die Anwendung dynamischer Synthesen aber auch der Heatpipe-Technologie in Vorbereitung. Vor allem aber konnte mit den Vorbereitungen für den Antrag zu einem Demonstrationsprojekt im Rahmen des Teilprojekts 1-1 begonnen werden.

6 Vorträge & Poster 2018

- B. Schmitt; P. Bauer, J. Karl, L. Zigan, S. Will. Simulation eines kombinierten HP-ORC-Systems zur Energiespeicherung unter Aufwertung von Niedertemperaturwärme. Jahrestreffen der ProzessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2018
- D. Scharrer; B. Schmitt, P. Bazan, L. Zigan, S. Will, J. Karl, R. German. Properties of Reversible Heat Pump ORC Energy Storage Systems for Base Load Generation. IRES, 2018
- T. Kohler, J. Schmalen, K. Müller. Röntgen-Computertomographie zur Untersuchung von Phasenwechselmaterialien. Thermodynamik-Kolloquium, 2018
- T. Kohler, J. Schmalen, K. Müller. Neue Analysemethoden für latente thermische Energiespeicher. ProcessNet-Jahrestagung, 2018
- T. Kohler, K. Müller. Computertomographische Analyse des Lade- und Entladevorgangs eines latenten thermischen Energiespeichers. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2018
- T. Kohler, K. Müller. Computertomographie zur Analyse latenter Wärmespeicher. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Mehrphasenströmung, 2018
- Lange, C.; Müller, D.; Karl, J.: Peak-Load High-Temperature Carbonate Storage. 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Prag, Tschechien, 02.-05.07.2018.
- Lange, C.; Müller, D.; Karl, J.: Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher. ProcessNet 2018, Jahrestreffen Fachgruppe HTT, Bremen, 06.-09.03.2018.
- Neubert, M.; Hauser, A.; Dillig, M.; Karl, J.: Heatpipe-gekühltes Reaktorkonzept für die katalytische Methanisierung in power-to-gas Anwendungen. ProcessNet 2018, Jahrestreffen Fachgruppe EVT, Frankfurt/Main, 07.-08.03.2018.

- D. Steger; C. Regensburger; E. Schlücker. Planung einer regenerativen Wärmepumpen-ORC-Anlage. CBI Symposium, 2018
- D. Steger; E. Schlücker. Planung einer reversiblen Wärmepumpen-ORC-Anlage. EnCN Jahreskonferenz, 2018
- J. Albert, J. Reichert, P. Schühle, P. Wasserscheid, A. Tremel, K. Stark, M. Baldauf, "Optimization of a dynamic methanol synthesis process", Vortrag zum Jahrestreffen Reaktionstechnik 2018, Würzburg-Germany.
- P. Schühle, J. Albert, P. Wasserscheid, „Development of catalysts for a dynamic carbon dioxide hydrogenation process“, Posterbeitrag zum Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, 2018, Frankfurt-Germany.

7 Veröffentlichungen 2018

- S. Staub, P. Bazan, K. Braimakis, D. Müller, C. Regensburger, D. Scharrer, B. Schmitt, D. Steger, R. German, S. Karellas, M. Pruckner, E. Schlücker, S. Will, J. Karl. Reversible Heat Pump–Organic Rankine Cycle Systems for the Storage of Renewable Electricity. *Energies*, 11, 1352, 2018
- T. Kohler, T. Biedermann, K. Müller. Experimental study of $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as thermochemical energy storage material. *Energy Technology*, 6, 1935, 2018
- T. Kohler, T. Kögl, K. Müller. Study of the crystallization and melting behavior of a latent heat storage by computed tomography. *Chemie Ingenieur Technik*, 90, 366, 2018
- M. Neubert, A. Hauser, B. Pourhossein, M. Dillig, J. Karl, Experimental evaluation of a heat pipe cooled structured reactor as part of a two-stage catalytic methanation process in power-to-gas applications, *Appl. Energy*. (2018). doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.
- L.M. Chepyga; E. Hertle; A. Ali; L. Zigan; A. Osvet; C.J. Brabec; M. Batentschuk. Synthesis and photoluminescent properties of the Dy^{3+} doped YSO as high-temperature thermographic phosphor. *Journal of Luminescence*, 197, 23-30, 2018
- L.M. Chepyga; A. Osvet; A. Ali; Y. Zorenko; V. Gorbenko; T. Zorenko; A. Fedorov; C. Brabec; M. Batentschuk. New silicate based thermographic phosphors $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Dy}$, $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Dy,Ce}$ and their photoluminescence properties. *Journal of Luminescence*, 202, 13-19, 2018

8 Literaturverzeichnis

- [1] D. Scharrer, B. Schmitt, P. Bazan, R. German, L. Zigan, S. Will, J. Karl, Properties of Reversible Heat Pump ORC Energy Storage Systems for Base Load Generation, in: 12th Int. Renew. Energy Storage Conf. (IRES 2018), Düsseldorf, 2018.
- [2] S. Staub, P. Bazan, K. Braimakis, D. Müller, C. Regensburger, D. Scharrer, B. Schmitt, D. Steger, R. German, S. Karellas, M. Pruckner, E. Schlücker, S. Will, J. Karl, S. Staub, P. Bazan, K. Braimakis, D. Müller, C. Regensburger, D. Scharrer, B. Schmitt, D. Steger, R. German, S. Karellas, M. Pruckner, E. Schlücker, S. Will, J. Karl, Reversible Heat Pump–Organic Rankine Cycle Systems for the Storage of Renewable Electricity, *Energies*. 11 (2018) 1352. doi:10.3390/en11061352.
- [3] R. German, P. Bazan, A. Awad, Rapid Prototyping with i7-AnyEnergy and Detailed Co-Simulation with SGsim, in: 7th D-A-CH+ Energy Informatics Conf., Oldenburg, 2018.
- [4] G.S. Grasa, J.C. Abanades, CO_2 capture capacity of CaO in long series of carbonation/calcination cycles, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 8846–8851. doi:10.1021/ie0606946.
- [5] J.C. Abanades, The maximum capture efficiency of CO_2 using a carbonation/calcination cycle of CaO/CaCO_3 , *Chem. Eng. J.* 90 (2002) 303–306. doi:10.1016/S1385-8947(02)00126-2.
- [6] V. Manovic, E.J. Anthony, G. Grasa, J.C. Abanades, CO_2 Looping Cycle Performance of a High-Purity Limestone after Thermal Activation/Doping, *Energy & Fuels*. 22 (2008) 3258–3264. doi:10.1021/ef800316h.
- [7] M. Neubert, A. Hauser, B. Pourhossein, M. Dillig, J. Karl, Experimental evaluation of a heat pipe cooled structured reactor as part of a two-stage catalytic methanation process in power-to-gas applications, *Appl. Energy*. (2018). doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.002.
- [8] S. Rönsch, J. Köchermann, J. Schneider, S. Matthischke, Global Reaction Kinetics of CO and CO_2 Methanation for Dynamic Process Modeling, *Chem. Eng. Technol.* 39 (2016) 208–218. doi:10.1002/ceat.201500327.
- [9] F. Koschany, D. Schlereth, O. Hinrichsen, On the kinetics of the methanation of carbon dioxide on coprecipitated $\{\text{NiAl}\}(\text{O})_x$, *Appl. Catal. B Environ.* 181 (2016) 504–516. doi:10.1016/j.apcatb.2015.07.026.

SPEICHER B

Projektbericht 2018

Ziel des Projektes Speicher B ist es, die LOHC-Technologie bis 2022 zu einer marktreifen Technologie weiter zu entwickeln. Dabei werden drei wesentliche Stoßrichtungen verfolgt: die Weiterentwicklung der Speichertechnologie für stationäre Anwendungen, die Entwicklung wesentlicher Aspekte für die Nutzung der Technologie in der Wasserstofflogistik und die geschickte Kopplung der LOHC-Technologie mit anderen Technologien wie z.B. die geschickte Verschaltung von BHKWs mit dem LOHC-Prozess. Der Standort Nürnberg ist hervorragend geeignet, da das Department CBI der FAU mit den Lehrstühlen für Chemische Reaktionstechnik, Prozessmaschinen und Anlagentechnik und Technische Thermodynamik nahezu alle Aspekte der Technologie abdecken können. Zudem bestehen durch den Helmholtz-Direktor Prof. Dr. Peter Wasserscheid sehr viele Anknüpfungspunkte zum Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien. Darüber hinaus existiert ein enges Netzwerk mit beispielsweise dem Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen und Bauelemente sowie verschiedenen Unternehmen der Region (Hydrogenious Technologies, als Technologieführer der LOHC-Technologie, sowie Siemens und AREVA).

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 TPJ 1: Effiziente Wasserstoffspeicherung

1.1 Hochtemperatur-Hydrierung / Katalysatoroptimierung

Das Unterprojekt wurde am Lehrstuhl von Prof. Peter Wasserscheid durchgeführt. Im Rahmen des Projekts sollen vor allem neue und optimierte Katalysatoren entwickelt werden. Ein wesentlicher Ansatzpunkt für die Optimierung der Hydrierung und Dehydrierung ist die Katalyse. In der Hydrierung sollten die Temperaturen zu möglichst hohen Temperaturen verschoben werden um die Reaktionswärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau nutzen zu können. Dieser Ansatz ergänzt die Arbeiten am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg, wo vor allem eine Reduktion des Temperaturniveaus der Dehydrierung angestrebt wird. Dadurch ist eine Nutzung der hochwertigen Hydrierwärme in der Dehydrierung denkbar, wenn geeignete Speichermethoden gefunden werden. Das Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg strebt eine Reduktion der Dehydriertemperatur auf ca. 200-230 °C an.

Am EnCN soll vor allem das sog. oneReactor-Konzept vorangetrieben werden. Bei diesem Konzept übernimmt ein Reaktor mit einem Katalysator sowohl Hydrierung als auch Dehydrierung. Dieses System soll ein wesentlicher Teil der Arbeiten im Speicherhaus sein. Das Speicherhaus ist ein Energieforschungslabor indem verschiedene Technologien aus Speicher B sowie Speicher A untersucht werden sollen. Der oneReactor ist die Basis der LOHC-Forschungen und an diesem können dann andere Technologien wie z.B. die Hochtemperatur-Wärmespeicher oder Wasserstoffkompressoren getestet werden. Insbesondere die Hochtemperatur-Wärmespeicher sind für das oneReactor – oneTemperature Konzept von besonderem Interesse, da die Hydrierwärme so für einen nachfolgenden Dehydrierschritt zwischengespeichert werden kann.

Wie im Jahresbericht 2017 bereits erwähnt muss das Speicherhaus für diese Arbeiten zunächst ertüchtigt werden. Die Abstimmungen zwischen den Partnern und die Klärung der Kostenübernahme führten dazu, dass die Arbeiten

tatsächlich erst im Winter 2018 begonnen wurden. Mit Erscheinen dieses Berichtes sind die Arbeiten abgeschlossen und der Bezug kann beginnen.



Abbildung 1: Hydrierautoklav für Batch-Untersuchungen zum oneReactor-Verfahren

Um die lange Wartezeit auf die Halle zu überbrücken wurde ein Hochtemperatur-Hydrierautoklav am EnCN aufgebaut und in Betrieb genommen. Das in Abbildung 1 dargestellte System verträgt Temperaturen bis 350 °C bei Drücken bis 500 bar und ist damit hervorragend für den Einsatz als heiße Wasserstoff-Batterie geeignet. Bei diesem Konzept wird zwischen Einspeichern bzw. Ausspeichern ausschließlich durch eine Veränderung des Systemdrucks gewechselt.

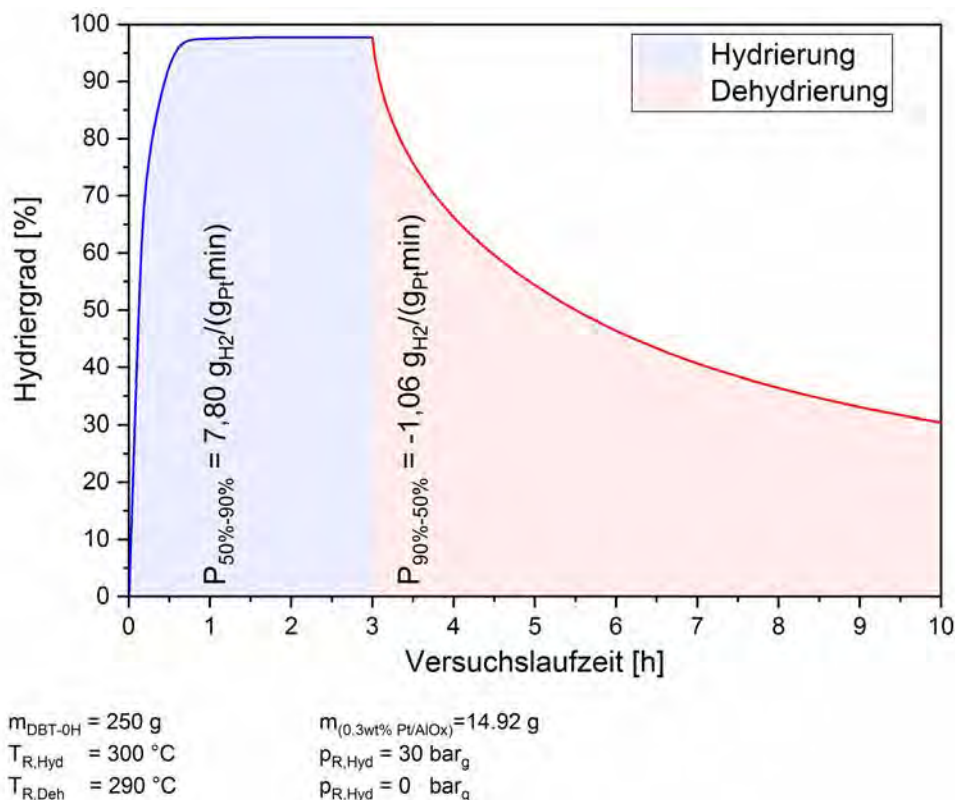


Abbildung 2: Batch-Hydrierung und Dehydrierung im Hochtemperatur-Autoklaven mit dem neu entwickelten Katalysatorsystem

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen solchen Speicher- und Freisetzungsvorgang für ein Druckfenster von 0 bis 30 bar_g. Die Hydrierung als exotherme Reaktion ist bei 300 °C mit einem Wasserstoffverbrauch von 7,8 g_{H₂}·(g_{Pt}·min)⁻¹ wesentlich aktiver als die Freisetzung mit einer Produktivität von 1,06 g_{H₂}·(g_{Pt}·min)⁻¹.

Die Erkenntnisse zu geeigneten Betriebspunkten und Fahrweisen sollen 2019 im in der Halle installierten oneReactor-System erprobt 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 und vor allem Abwärme industrieller Prozesse oder allgemein exothermer Reaktionen wie die LOHC-Hydrierung sinnvoll wiederverwenden zu können. Dabei sollen die eingesetzten Reaktanden möglichst ungiftig sein und eine gute Wärmeübertragung ermöglichen.

Die beim LOHC-Hydrierungsprozess zur Verfügung stehende Wärme liegt auf einem Temperaturniveau deutlich über 100 °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 Reaktionssystemen, welche auf Feststoffen basieren. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Systeme dargestellt, die auf Grund ihres Temperaturbereichs für dieses Teilprojekt besonders relevant sind.

Tabelle 1: Übersicht thermochemischer Energiespeicher

Reaktionssystem	Reaktionsgleichung	Anwendungsbereich
Calciumchlorid - Wasser	$\text{CaCl}_2 + n \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \Delta H_R$	< 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 (Tab. 1) auf poröse Trägermaterialien aufgebracht, 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 (Tab. 1) untersucht werden.

1.2.2 Ergebnisse aus dem Jahr 2018

Die neu angeschaffte STA (Simultane Thermische Analyse) mit TG-Sensor (Thermogravimetrie) und Wasserdampfgenerator wurde erfolgreich in Betrieb genommen und es konnten erste vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Diese erlaubt es das Probengewicht während der Hydratisierung und Dehydratisierung zu verfolgen. Ein weiterer Vorteil ist, dass mehrzyklische Messungen automatisch durchführbar sind und somit eine erhebliche Zeitersparnis der Stabilitätstest ermöglicht wird.

Die durch Beladung von porösen Trägern mit den genannten Verbindungen (Tab. 1) erhaltenen Komposite wurden auf ihre Speichereigenschaften in der STA untersucht. Dabei wird auf Grund der exothermen Hydratisierungsreaktion mit Hilfe von Wasserdampf der thermische Speicher entladen, wodurch die Temperatur steigt. Nach abgelaufener Reaktion sinkt die Temperatur wieder auf das Ausgangsniveau ab (Abb. 1a). Die endotherme Dehydratisierungsreaktion wird durch das Einleiten eines trockenen Gasstromes erreicht, wobei die Temperatur sinkt.

Das MgO/Mg(OH)₂-System zeigt sich als reaktionsträge, da die Geschwindigkeit der Hydratisierung und Dehydratisierung sehr langsam erfolgt. Mit Zeolith Y können im Vergleich zum System CaCl₂/H₂O und MgO/H₂O hohe Temperaturhübe (ΔT) während der Hydratisierung erzielt werden (Abb. 1a). Bei einer Reaktortemperatur von 180 °C kann eine Temperaturdifferenz von über 120 °C beobachtet werden. Bei einer höheren Reaktortemperatur von 250 °C wird jedoch eine geringere Temperaturdifferenz von ca. 100 °C erhalten. Des Weiteren ist die gute Stabilität des Zeolith Y über mehrere Zyklen hinweg bemerkenswert (Abb. 1b). Die Wasseraufnahmefähigkeit bleibt über 20 Zyklen weitestgehend konstant und liegt durchschnittlich bei einer Gewichtsänderung von 17 Gew.-%.

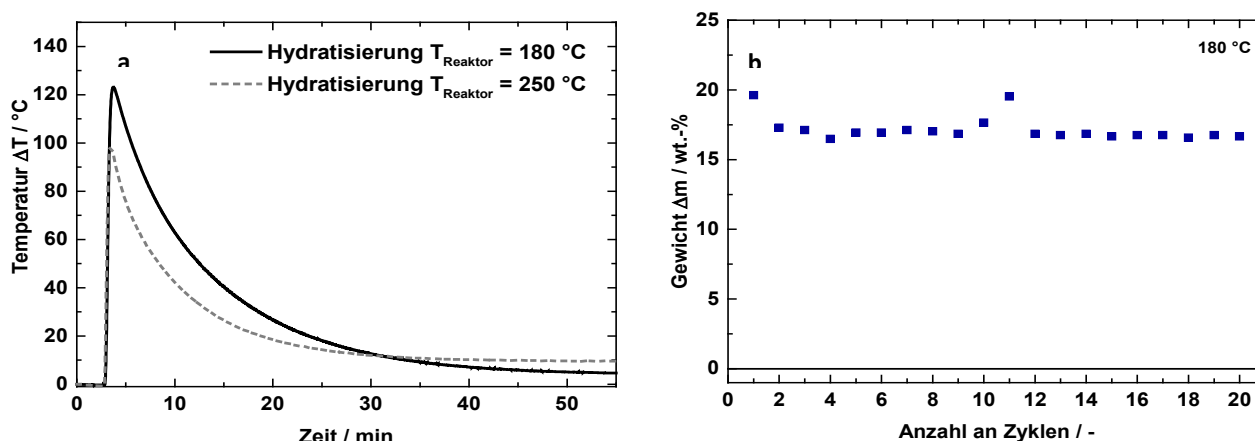


Abbildung 3: a) Temperaturprofil während der Hydratisierung von Zeolith-Y-Pellets bei Reaktortemperaturen von 180 °C und 250 °C, gemessen in der Versuchsanlage; b) Gewichtsänderung von Zeolith-Y-Pellets während der Hydratisierung bei 180 °C gemessen in der STA

Durch die erhaltenen Ergebnisse wird das gute Zusammenspiel der Testanlage und der STA deutlich. Die Daten ergänzen sich sehr gut und liefern zudem interessante Resultate um Forschungslücken zu schließen bzw. anwendungsorientierte Materialien zu synthetisieren. Zusammenfassend konnte ein vielversprechender Ansatz für die thermische Energiespeicherung im LOHC-Prozess gefunden werden.

1.2.3 Derzeitige Forschung und Ausblick

Mit Hilfe der Fördermittel konnte ein zusätzlicher TG-DSC-Sensor (Dynamische Differenzkalorimetrie, engl. *differential scanning calorimetry*) für die STA angeschafft werden. Dieser ist eine hervorragende Ergänzung zu dem aktuellen Setup. Der Sensor ermöglicht es genaue kalorimetrische Daten beim Energiespeicherungs- und Entladungsprozess aufzunehmen, um somit die Materialeigenschaften besser charakterisieren und optimieren zu können. In Kombination mit den, am Lehrstuhl vorhandenen Analysemethoden wie NMR-, IR-Spektroskopie usw. stellt der gegenwärtige Messaufbau ein besonderes Setting für dieses Forschungsgebiet dar.

Aktuell wird an weiteren Materialien ausgehend von MOFs (engl. *metal organic framework*) und Silikaliten geforscht. Darüber hinaus wird mit akademischen und industriellen Kooperationspartnern zurzeit nach einem neuen Synthesekonzept für entsprechende Speichermaterialien gesucht. Außerdem sollen die bereits erhaltenen Ergebnisse mit Zeolithen weiterbearbeitet und mit dem neuen DSC-Sensor kalorimetrisch untersucht werden. Dazu sollen im Laufe des Jahres eine oder mehrere Abschlussarbeiten von Studenten angefertigt werden.

2 TPJ 2: Effiziente Wasserstofflogistik

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

Inhalt des Teilprojektes ist die Entwicklung und Realisierung eines neuartigen Heizkonzeptes für die LOHC-Dehydrierung in LOHC-Speichersystemen. Dabei wird die im Freisetzer benötigte Energie über eine direkte Beheizung mit einem Brenner eingebracht.

In Abstimmung mit dem Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT, Prof. Wasserscheid) wird ein kombiniertes System aus Brenner und Wärmeübertrager für die Beheizung des Freisetzers entwickelt, dimensioniert, konstruiert und umgesetzt. Nachdem bereits ein voll funktionsfähiger, kostengünstiger und skalierbarer Laboraufbau entwickelt und in Betrieb genommen wurde, wurden nun Messungen zur Charakterisierung und eine simulative Abbildung des Systems durchgeführt. Des Weiteren erfolgte anhand der bisher gewonnenen Erkenntnisse die Planung für eine Optimierung und einen Umbau der bestehenden Anlage.

Im Berichtszeitraum wurden zunächst weitere Aufheizuntersuchungen an der aufgebauten kleinskaligen Prototyp-Laboranlage durchgeführt (siehe Abbildung 4).

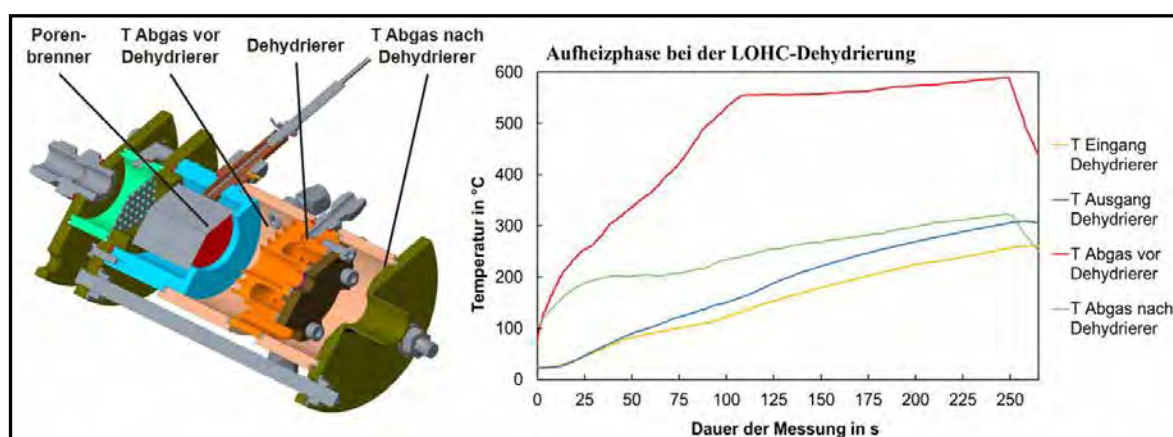


Abbildung 4: System mit einem Porenbrenner als Wärmequelle und nachgeschaltetem Dehydrierer (links) sowie Aufheizzeit und resultierende Temperaturen bei einer Brennerleistung von 1,5 kW (rechts)

Diese zeigen, dass der gewünschte Temperaturbereich für die Dehydrierung des im LOHC gebundenen Wasserstoffs von 280°C - 320°C erreicht wird. Des Weiteren kann durch die direkte Beheizung mit einem Brenner eine hohe Dynamik im System realisiert werden. Die Abgastemperatur des methanbetriebenen Porenbrenners beträgt ca. 580°C vor der Dehydriereinheit und ca. 320°C nach der Dehydriereinheit. Diese Werte untermauern die hervorragende Übertragung der Abgaswärme in den Freisetzer. Im Dehydrierer ergeben sich an der Einlassseite eine Temperatur des LOHC-Stroms von ca. 230°C und am Auslass ca. 300°C. Wird der Porenbrenner mit einer Leistung von 0,5 kW betrieben, ergibt sich eine Aufheizzeit von ca. 25 Minuten. Erhöht man die Leistung auf 1,5 kW, so ist das System bereits nach ca. 4 Minuten auf Betriebstemperatur und die oben genannten Temperaturen ergeben sich (Abbildung 4 rechtes Bild).

Für eine Simulation des Wärmeübergangs in der Dehydriereinheit müssen sämtliche thermischen Randbedingungen im System definiert werden. Hierfür erfolgten Messungen der Oberflächentemperatur an der Porenbrenneroberfläche und an den äußeren Wänden der Prototyp-Laboranlage. Diese wurden mit der IR-Kamera (FLIR, T540) durchgeführt. Der für die Messungen erforderliche Emissionskoeffizient zur Bestimmung der Temperaturen entstammt aus der Literatur und aus eigenen Kalibriermessungen in einem Hochtemperaturofen (Supertherm HT 18/10, maximale Temperaturen von 1800°C sind hiermit erreichbar) mit einer Regelgenauigkeit von 5 K. In der Nähe der Probe wurde die Temperatur im Ofen mit einem Thermoelement überprüft (Typ B, 0,75 % Messungenauigkeit). Die resultierenden Oberflächentemperaturen am Schaum des Porenbrenners waren im Mittel zwischen ca. 650°C bei einer Leistung von 0,25 kW und ca. 1200°C bei einer Brennerleistung von 3,0 kW. Diese Werte veranschaulichen sehr gut den großen Leistungsmodulationsbereich des Porenbrenners. Für die äußeren Wände wurden Temperaturwerte zwischen ca. 200°C und 300°C bestimmt.

Die simulative Abbildung des Systems durch eine statische Simulation des Aufheizvorgangs wurde mit der Software Star-CCM+ durchgeführt. Das Gesamtmodell bestand hierbei aus ca. 2 Millionen Zellen. Die Modellierung des Porenbrenners erfolgte vereinfacht ohne Detailnachbildung des Verbrennungsvorgangs über die zuvor gemessenen Oberflächentemperaturen und die zugehörigen Abgastemperaturen. Bei den Wärmeübertragungsvorgängen wurde sowohl die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Konvektion als auch durch Strahlung berücksichtigt. Alle Strömungen im Modell sind laminar und das Abgas entweicht in die Umgebung gegen Umgebungsdruck. Abbildung 5 zeigt die Strömung im Brenner und im Bereich des Wärmeübertragers zur Dehydriereinheit (links) sowie die Temperaturverteilung in der Dehydriereinheit auf Höhe der Thermoelemente (rechts).

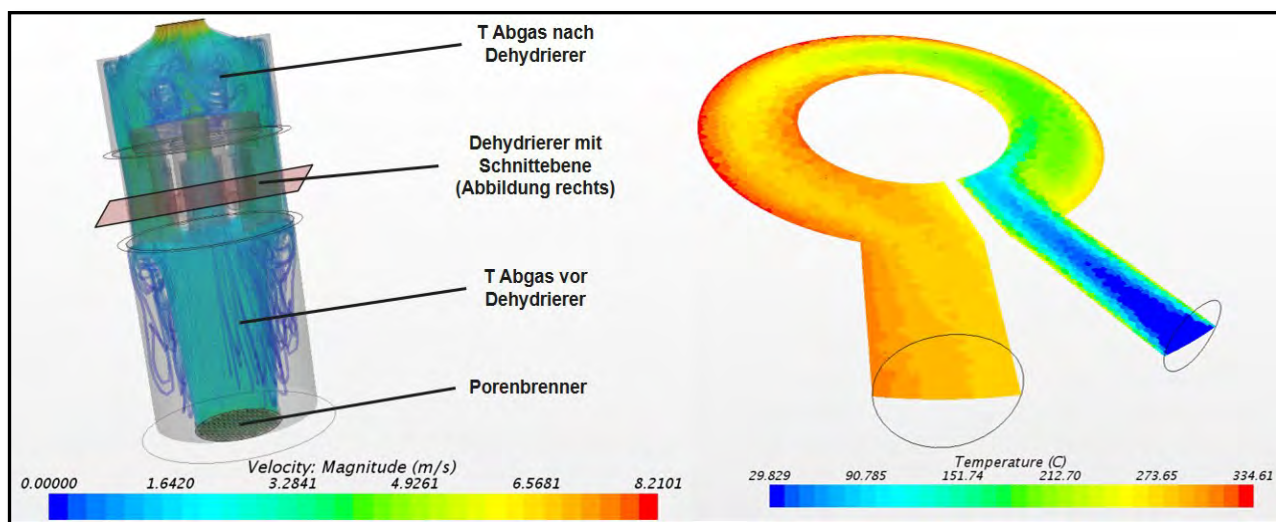


Abbildung 5: Simulation der Strömungslinien im System mit einem Porenbrenner als Wärmequelle und nachgeschaltetem Dehydrierer (links) sowie der Temperaturverteilung in der LOHC-Dehydriereinheit (rechts)

Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine plausible Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in der Dehydriereinheit. Ebenso stimmen die berechneten Temperaturen in Näherung gut mit den gemessenen Temperaturen überein. Eine Abbildung der Wasserstofffreisetzung in der Simulation wird nicht angestrebt. Mit Hilfe der erhaltenen Simulationsdaten

ist ein vertieftes Verständnis des Aufheizprozesses durch die Temperaturverläufe möglich. Außerdem werden etwaige Temperaturspitzen sichtbar und eine effektive Positionierung der Thermoelemente zur Detektion dieser Temperaturmaxima wird erleichtert.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird die Anlage im kommenden Jahr umgebaut und optimiert. Es werden Komponenten für die Datenaufnahme bei der Wasserstofffreisetzung und zusätzliche Sicherheitseinrichtungen für Langzeittests mit hydriertem LOHC hinzugefügt. Anschließend können erneut Messdaten generiert werden.

Der aktuelle Stand des Projekts wurde im Rahmen einer Posterpräsentation auf dem Thermodynamik-Kolloquium 2018 und eines Vortrags auf der Jahreskonferenz berichtet (siehe Abschnitt 3). Des Weiteren werden aktuell zwei studentische Arbeiten im Rahmen der Forschungstätigkeit betreut.

Im weiteren Projektverlauf soll der Umbau der Versuchsanlage erfolgen. Außerdem werden weitere Messdaten zum Aufheizvorgang und zur Wasserstofffreisetzung erzeugt. Die Variation von verschiedenen Einflussparametern wird durchgeführt, um den Aufheizvorgang besser zu verstehen. Anschließend fließen die gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung der Dehydriereinheit.

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. Es ist nicht zielführend, den produzierten Wasserstoff energetisch zu verwerten um diese Wärmemenge für die Reaktion zu erzeugen. Ein möglicher Ansatz für die Bereitstellung dieser Energie ist die direkte elektrische Beheizung des Reaktionsapparates.

Am Lehrstuhl wurde im Rahmen des Exzellenzclusters „Engineering of Advanced Materials“ zusammen mit den Werkstoffwissenschaften ein Konzept auf Basis von additiv gefertigten Reaktoren entwickelt.¹ Diese metallischen Reaktoren lassen sich mit einer katalytisch aktiven Komponente beschichten und damit die Dehydrierungsreaktion katalysieren. Für die zweite Förderphase des EnCN sollen diese additiv gefertigten Bauelemente nun als elektrische Widerstandsheizung genutzt werden und dadurch die Reaktionswärme direkt am Ort des Verbrauchs bereitgestellt werden.



Abbildung 6: Foto des Reaktors für die direkt-elektrisch beheizte LOHC-Dehydrierung

¹ W. Peters, M. Eypasch, T. Frank, J. Schwerdtfeger, C. Körner, A. Bösmann, P. Wasserscheid, „Efficient hydrogen release from perhydro-*N*-ethylcarbazole using catalyst-coated metallic structures produced by selective electron beam melting“, *Energy Environ. Sci.*, **2015**, 8, 641-649

Abbildung 6 zeigt den dafür entwickelten Versuchsaufbau. Der Reaktor wird senkrecht von unten nach oben durchströmt. Die durch additive Fertigung produzierte Struktur ist in der Mitte des Reaktors zu sehen. Um die Struktur als Widerstandsheizung nutzen zu können, wird diese über zwei eingeschraubten Kupferstifte elektrisch kontaktiert. An den Kupferstiften lässt sich über entsprechende Klemmung und ein Labornetzteil eine Leistung bzw. eine Stromstärke aufprägen. Durch den elektrischen Widerstand der Struktur erwärmt sich diese sowohl in axialer als auch in radialer Richtung. Dies ermöglicht einen sehr gleichmäßigen Wärmeeintrag in die Reaktionszone. Die Anlage wurde aufgebaut und zunächst in der Beheizung von kaltem LOHC bis auf Reaktionstemperatur mit einer Struktur aus einer Titanlegierung untersucht.

Wie im Jahresbericht 2017 angekündigt wurde vor allem der Wärmeeintrag in die Strukturen untersucht und versucht einen Zusammenhang zwischen Strukturgeometrie und Wärmeeintrag herzustellen.

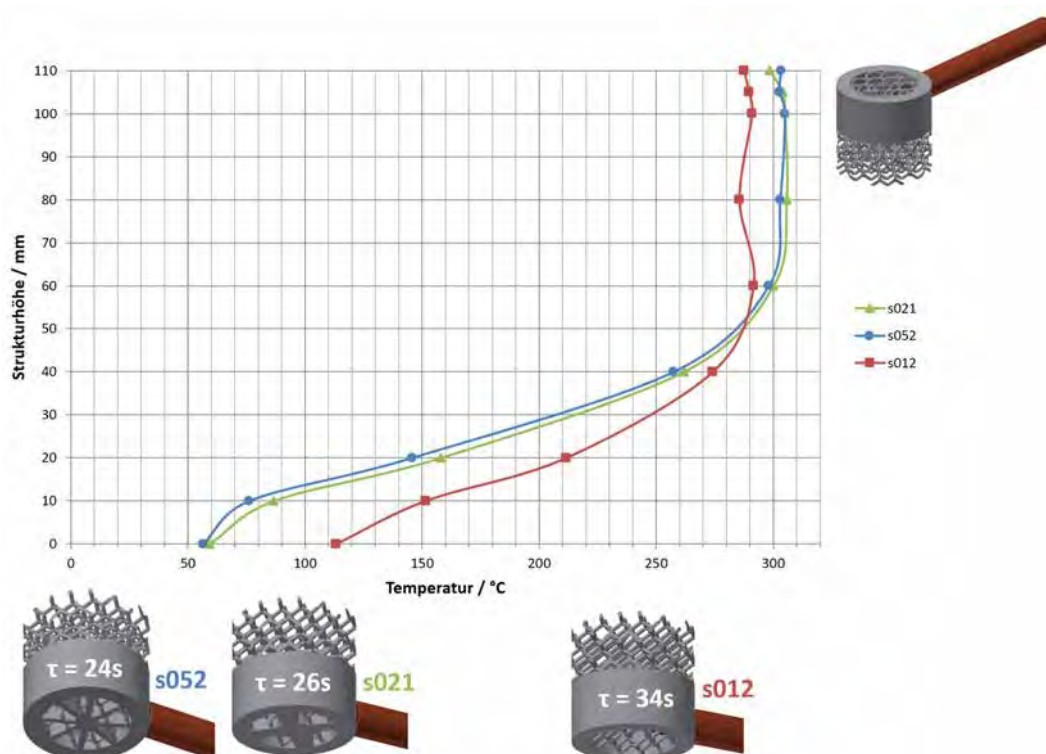


Abbildung 7: Abhängigkeit des Temperaturprofils von der Einlassgeometrie

Wie in Abbildung 7 beispielhaft erkennbar ist, beeinflusst beispielsweise die Einlassgeometrie (s021: Kreuz mit dicken Stegen; s052: Stern mit dünnen Stegen; s012: Keine weitere Einlassgeometrie) das entstehende Temperaturprofil an der Struktur. Ein Fehlen einer Einleitstruktur, wie bei der Struktur s012 zeigt beispielsweise eine etwa 50 °C höhere Temperatur am unteren Einlass, als dies bei Strukturen mit Einlassstruktur der Fall ist. Die gezeigten Einlassstrukturen haben aufgrund ihres höheren Stegdurchmessers deutlich niedrigere elektrische Widerstände und damit auch niedrigere Temperaturen. Allerdings sind sie gut geeignet um die Strömung aufzuteilen sowie die Verweilzeit zu reduzieren. Aus diesem Grund erreichen die Strukturen mit Einlassgeometrie auch am Ende der Struktur höhere Temperaturen im Wärmeträgermedium als dies bei der Struktur s012 der Fall ist.

Im kommenden Projektjahr sollen einige der vielversprechendsten Strukturen mit katalytisch aktivem Material beschichtet und in der Dehydrierung von Perhydro-Dibenzyltoluol untersucht werden.

2.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Die enge Kooperation zwischen Ingenieuren und Wirtschaftswissenschaftlern im FSP 2 ermöglicht eine umfassende und präzise Analyse der Wirtschaftlichkeit der LOHC-Technologie und vergleichbarer Alternativen wie Fischer-Tropsch Diesel oder Methanol. Gleichzeitig erlauben die Arbeiten eine integrierte Betrachtung von Mobilitätskonzepten und Strommärkten. Eine enge Zusammenarbeit besteht diesbezüglich mit dem EnCN-Projekt „Energemarktdesign“ (EMD).

Mittelfristiges Ziel ist der Vergleich der Produktionskosten verschiedener electric fuels (e-fuels) im In- und Ausland. Dabei kommt der produzierten Menge e-fuels eine herausragende Bedeutung zu. Aufgrund des hohen Energiebedarfs der Synthese größerer Mengen Kraftstoffs, kann die Produktion die Preisbildung am Strommarkt beeinflussen und damit beispielsweise Investitionen in neue Stromerzeugungskapazitäten katalysieren oder zu höheren Preisen führen. Durch die zum Teil sehr flexibel steuerbare Stromnachfrage der Anlagen können sich durch eine geschickte Standortwahl jedoch auch positive Effekte auf das Engpassmanagement oder den Netzausbau ergeben. Die positiven wie negativen Effekte der heimischen Produktion gilt es zu quantifizieren und dem Import der e-fuels aus dem Ausland gegenüberzustellen.

Auch auf Grund der großen benötigten Menge gilt die Herstellung der Kraftstoffe im Ausland mit anschließendem Transport nach Deutschland als unverzichtbar. Als Produktionsstandorte bieten sich Gegenden mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien an. Sehr wind- oder sonnenreiche Standorte zeichnen sich auf Grund der widrigen Witterungsbedingungen häufig durch eine relativ geringe Bevölkerungsdichte und dadurch bedingten unzureichender Infrastruktur aus. Sämtliche Betriebsmittel, wie Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, thermische und elektrisch Energie müssen daher vor Ort gewonnen werden. Die Prozesskette von der Erzeugung der Betriebsmittel über die Synthese der Kraftstoffe, den Transport nach Deutschland und Weiterverteilung an die Tankstellen bis hin zur energetischen Verwertung im Auto wurde modelliert. Dafür mussten notwendige Systemkonfigurationen und relevante technische und wirtschaftliche Parameter für das Modelljahr 2035 identifiziert werden. Die Wahl des Jahres 2035 eröffnet zum einen die Möglichkeit der Integration des e-fuel Modells in bereits bestehende Modellumgebungen aus dem Bereich des Energiemarktdesigns, welche auf Grund der guten Datenlage mit Parameterwerten für 2035 kalibriert sind. Zum andern kann zu diesem Zeitpunkt von einem hohen Reifegrad der verwendeten Technologien ausgegangen werden.

Die Auswertungen des mathematischen Modells ergeben endogen die kostenminimalen Kapazitäten der beteiligten Komponenten (bspw. PV- und Windkraftanlagen, Elektrolyseure, Syntheseanlagen, Speichertanks). Daraus können sowohl Aussagen über das Design einer systemkostenminimalen Prozesskette als auch Auslastungsgrade und notwendiges dynamisches Verhalten der Komponenten abgeleitet werden. Die Prozesskette kann beispielhaft für die Dieselproduktion in Ägypten (siehe Abbildung 8) nachvollzogen werden.



Beispiel für eine PV- und Windanlage

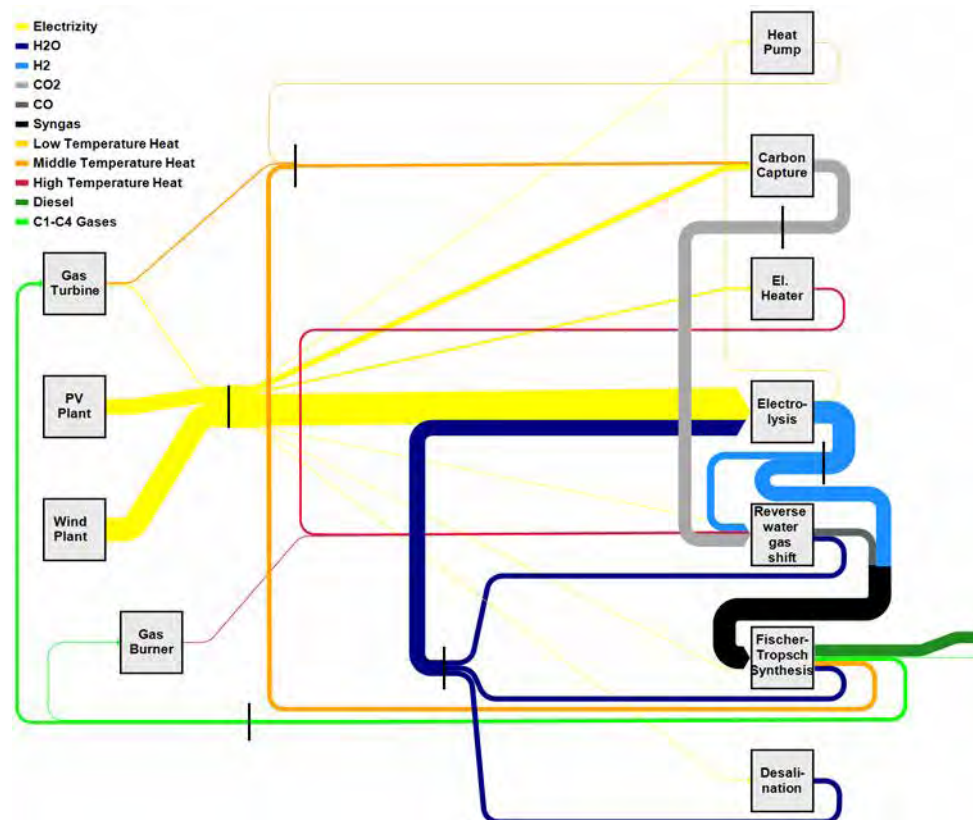


Abbildung 8: Sankey-Diagramm der Fischer-Tropsch-Dieselerstellung am Golf von Akaba in Ägypten

Neben Aussagen über die optimierte Prozesskette können überdies die Mobilitätskosten der verschiedenen e-fuels an unterschiedlichen Produktionsstandorten verglichen werden. Dabei zeigt sich in Abbildung 9 exemplarisch für LOHC, dass Standorte mit Zugang zu stetigen erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft oder Geothermie zu günstigeren Mobilitätskosten führen, als solche mit fluktuierenden Quellen wie PV oder Wind. Außerdem wird ersichtlich, dass die Kosten der Verteilung des Kraftstoffs innerhalb Deutschlands zum Teil die Kosten des Transports via Tanker aus dem Produktionsland deutlich übersteigen.



Nutzung von PV und Windkraft für die Mobilität

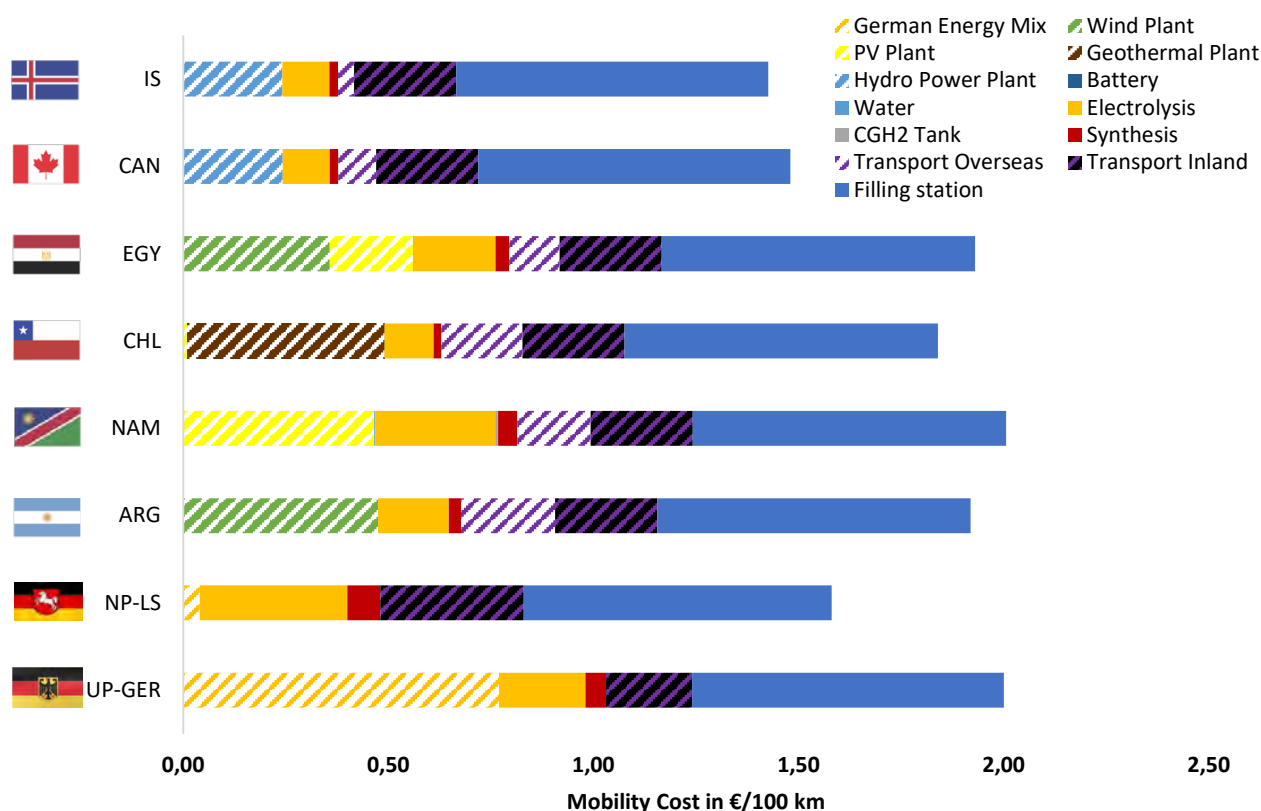


Abbildung 9: Vergleich der Mobilitätskosten eines Wasserstoffautos (Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle via LOHC) bei der Produktion des Kraftstoffs im Ausland (Island, Kanada, Ägypten, Chile, Namibia, Argentinien) und im Inland bei der Unterstellung verschiedener Strommarktdesigns (Produktion in Niedersachsen mit anschließendem Transport nach Bayern bei angenommenen Nodalpreisen (NP-LS) und Einheitspreisen (UP-GER))

Die Ergebnisse aus einer ersten Veröffentlichung (Runge et al. 2019) in diesem Themengebiet legen zudem nahe, dass die Produktion kleiner Mengen Kraftstoff in Deutschland wettbewerbsfähig zum Import der e-fuels aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energie sein kann (siehe Abbildung). Durch die Umstellung des Strommarktdesigns von Einheitspreisen (UP-GER) auf Nodalpreise (NP-LS) und der Produktion an Standorten mit hoher Überschussproduktion von erneuerbaren Energien lassen sich weitere Potentiale heben.

In einem weiteren Schritt soll die Produktion größerer Mengen Kraftstoffs in Deutschland und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Energiesystem und die Wohlfahrt in Deutschland untersucht werden. Dabei soll auch der Import von Energieäquivalenten aus dem Ausland zugelassen werden, um so eine Aussage über ein mögliches und optimales Verhältnis zwischen heimischer und ausländischer Produktion der Kraftstoffe treffen zu können.

Es soll weiter überprüft werden, wie sich die verschiedenen nachhaltigen Mobilitätskonzepte (Batteriebetriebene E-Auto, synthetische Kraftstoffe) auf die Strommärkte und den Netzausbau auswirken und welches Verhältnis der unterschiedlichen Technologien aus einer Systemperspektive optimal ist. Die Auswirkungen von batterieelektrischer Mobilität auf die Verteilnetzinfrastuktur wurde bereits in einer vom Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbes. Wirtschaftstheorie, betreuten Masterarbeit (Braun 2018) untersucht. Das erstellte mathematische Modell soll in einem nächsten Schritt in die bestehenden Netzmodelle integriert werden.

2.4 Wärmeübertragungskompressor für die Vorwärmung von LOHC

Die aktuelle Forschung zeigt den Fortschritt eines neuartigen Kolbenkompressors zur effizienteren Verdichtung von Wasserstoffgas bis 1000 bar. Das Ziel dieser konzeptionellen Forschung wird in dem vergangenen Jahr vorgelegten Bericht erläutert. Auch für den gleichen Zweck wird ein Schraubenverdichter/Pumpe Anlage gebaut, jedoch für wesentlich

niedrigere Förderdrücke. Der Fokus liegt auf dem Kolbenkompressor, da hier bereits Fortschritt gemacht wurde (siehe Abbildung 10).

Aus Sicherheitsgründen werden alle Experimente nur mit Stickstoffgas und dem beladenen Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) durchgeführt, dieser wird fortgesetzt bis ein sicherer und stabiler Zustand für den Betrieb mit Wasserstoff erreicht ist. Das aktuelle Design erklärt, wie die Kompressionswärme aufgenommen und später zur Dehydrierung von LOHC genutzt werden kann. Die Konstruktion der Verdichterammer enthält eine Nut, die mit dem kalten LOHC gefüllt ist. Wenn diese Nut überfüllt ist, beginnt der LOHC von den inneren Verdichterwänden nach unten zu fließen, so dass ein Fall-film entsteht (siehe Abbildung). Die Rolle dieses Fallfilms besteht darin, die Wände des Kompressors kalt zu halten und die Wärme aus der Verdichtung des Gases aufzunehmen. Das LOHC wird über eine Dosierpumpe mit exakter Durchflussmenge zur Optimierung der Wärmeübertragung in die Verdichterammer gepumpt. Um zu sehen, wie der Fall-film in den inneren Kompressor-wänden verteilt wird, wird ein Plexiglaszylinder hergestellt, durch diesen Aufbau kann das Fall-film Verhalten während des Betriebs untersucht werden. Gleichzeitig ist hier die Flüssigkeitsschicht zu sehen, die sich durch den Fall-Film über dem vorderen Ende des Kolbens bildet. Da der Kompressor mit einem Hydraulikaggregat angetrieben wird und eine variable Geschwindigkeit von 10 bis 40 mm/s sowie einen einstellbaren Hub von 50 bis 399,5 mm aufweist, kann die beste Betriebsgeschwindigkeit für die höchste Wärmeübertragung zwischen LOHC und Wasserstoff gewählt werden.



Abbildung 10: Kompressor Prüfstand

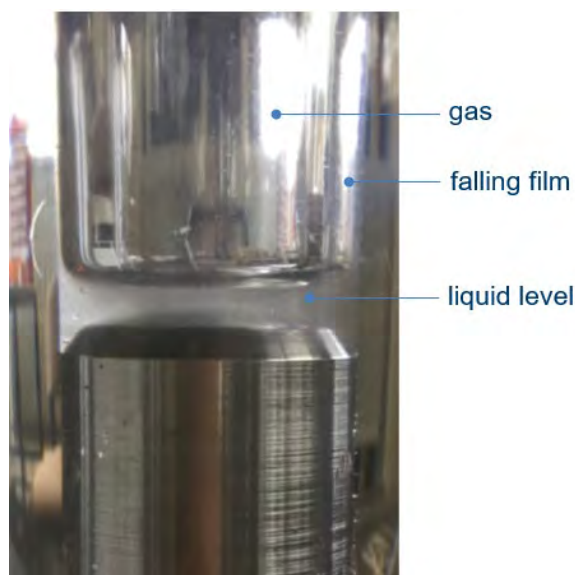


Abbildung 11: Fall-film und Flüssigkeitsschicht über dem Plunger

Wenn das Gas schnell komprimiert wird, bleibt nicht genügend Zeit für die Wärmeübertragung und das komprimierte Gas wird bei sehr hohen Temperaturen im Auslass gefördert.

Daher würde dies zu einem adiabatischen Verdichtungsprozess führen, der zu einem niedrigeren thermischen Wirkungsgrad führt, andererseits reduzieren sehr niedrige Geschwindigkeiten aber den Gesamt Wirkungsgrad des Verdichters. Eine nicht stationäre Zweiphasenströmungswärmeübertragung ist ein sehr schwer zu simulierender Vorgang, derzeit wird ein einfaches Modell ähnlich dem realen Kompressor erstellt und mit CFD simuliert. Bisher wird nur die Gasphase für die verschiedenen Geschwindigkeiten simuliert, um zu ermitteln wie viel Wärme während des Kompressionsprozess erzeugt wird. Dieses Modell kann nun auch für nicht-adiabatischen Prozesse verwendet werden. Basierend auf diesem Modell wird versucht, die Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas zu koppeln und herauszufinden, wie viel Wärme an das LOHC übertragen wird. Das Modell muss dann mit den experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Bislang werden in diesem Kolbenkompressor Drücke bis zu 630bar und die Auslass Gas Temperaturen ca. 115 °C erreicht (siehe Abbildung). Der Kolbengeschwindigkeit wurde auf 35mm/s eingestellt. Der Kompressor arbeitet mit einem Hubbereich von 100mm bis 399mm. Die Temperatur des LOHCs wird noch nicht gemessen.

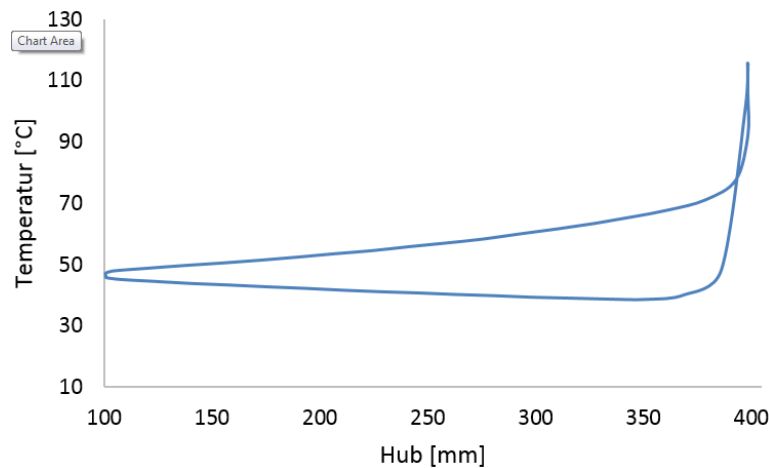


Abbildung 12: Temperaturanstieg von Stickstoffgas während der Verdichtung bis 630 bar

Die aktuelle Forschung bis 2018 wurde auch aus Drittmitteln unterstützt.

3 TPJ 3: Effiziente Wasserstoffnutzung

3.1 Arbeitsgruppe Prof. Wensing – BHKW im Wasserstoff-Erdgas Mischbetrieb

Flüssige organische Wasserstoffträgermaterialien (LOHC) bieten die Möglichkeit, Wasserstoff chemisch zu binden, wodurch eine sichere Speicherung und ein einfacher Transport gewährleistet werden kann. Bei Bedarf erfolgt die Dehydrierung des LOHC in Form einer endothermen katalytischen Reaktion. Die für die Freisetzung des Wasserstoffs benötigte Wärme ist dabei vom Trägermaterial abhängig; nachfolgende Ergebnisse beziehen sich alle auf Dibenzyltoluol bzw. Perhydrodibenzyltoluol. Zur Dehydrierung wird eine Wärme von 65 kJ je Mol Wasserstoff ($\triangleq$ 27 % des unteren Heizwertes von Wasserstoff) auf einem Temperaturniveau von rund 300 °C benötigt. Bei einer Verstromung des Wasserstoffs in Blockheizkraftwerken mit Hubkolbenmotoren kann die Abgasenthalpie zum Lösen des Wasserstoffs vom Trägermolekül genutzt werden. Allerdings ist bei hocheffizienten Wasserstoffmotoren die verfügbare Abgasenthalpie nicht ausreichend, um den benötigten Wasserstoffstrom bereitzustellen, so dass ein Zielkonflikt zwischen wirkungsgradoptimalem Betrieb und der Bereitstellung hinreichender Abgas-Energien für die Dehydrierung entsteht. Ein Mischbetrieb verschiedener Energieträger, insbesondere von regenerativ erzeugtem Wasserstoff mit Erdgas bzw. Methan kann diesen Zielkonflikt lösen. Untersucht werden die Auswirkungen der Zusammensetzung des Brenngases im Wasserstoff-Erdgas-Mischbetrieb auf Energieeffizienz, CO₂-Emission und Schadstoffemissionen, wobei die notwendige Energie für die Dehydrierung vollständig aus der Abgasenthalpie gedeckt wird.

Im Kalenderjahr 2018 wurde deshalb der Fokus auf das Brenngasmischungsverhältnis gelegt. Um den maximal möglichen Wasserstoffanteil im Brenngas abschätzen zu können, wurde ein halbempirisches Modell der Verbrennung entwickelt, welches zum einen auf der theoretischen Verbrennungsgleichung von Kohlenwasserstoffen und zum anderen auf den Motormessungen bei reinem Wasserstoffbetrieb des letzten Jahres basiert. Wesentlich die Abgasenthalpie und damit den Wasserstoffgehalt des Brenngases beeinflussende Parameter sind die Luftzahl (s. Abbildung , links) und die Lage des Verbrennungsschwerpunkts (s. Abbildung , rechts).

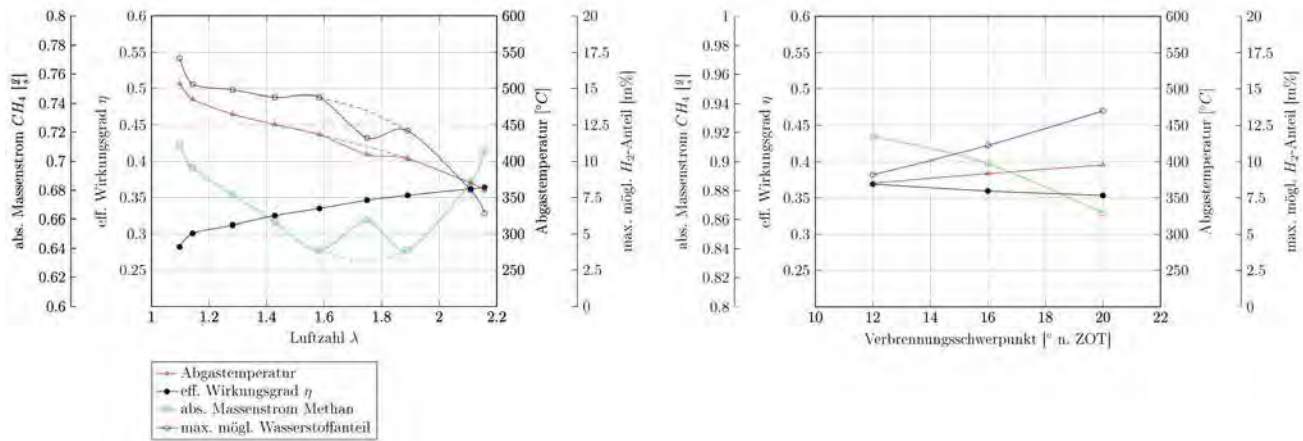


Abbildung 13: Messdaten (Wirkungsgrad und Abgastemperatur) und Ergebnisse (Wasserstoffanteil im Brenngas und absoluter Methanmassenstrom) der Berechnung für eine effektive Motorleistung von 21kw und einen konstanten Verbrennungsschwerpunkt bei 8 ° n. OT (links) bzw. eine konstante Luftzahl $\lambda = 2,35$ (rechts)

Als Ergebnis geht aus beiden Diagrammen hervor, dass der maximale Wasserstoffanteil im Brenngas zwischen 6 m% und 18 m% liegt. Um den Motor gesamtwirkungsgradoptimal betreiben zu können, ist eine Abmagerung des Gemischs auf Luftzahlen $\lambda > 2$ und die Positionierung des Verbrennungsschwerpunkts bei 8 ° n. OT notwendig. Die damit verbundene Reduktion der Abgasenthalpie führt zu einer Verringerung des Wasserstoffanteils im Brenngas. Ein regenerativoptimaler Betrieb, d.h. minimaler Methananteil, wird bei Luftzahlen $1,6 < \lambda < 1,9$ erreicht. Die Wasserstoffmenge im Brenngas beträgt in diesem Luftzahl-Bereich ca. 12 -13 m%. Dies entspricht einem Energieanteil des Wasserstoffs von 28 %.

Um das entwickelte Modell zu validieren, wurden Messungen an einem Versuchsmotor im Wasserstoff-Methan-Mischbetrieb vorbereitet. Dazu wurde ein vorhandener Vierzylinder-Motor auf Einzylinder-Betrieb umgerüstet. Ein für den Wasserstoff-Methan-Betrieb geeignetes Kraftstoffsystem steht nun ebenfalls bereits zur Verfügung. Die Brenngase werden aus Kosten- und Aufwandsgründen nicht in der Gasregelstrecke zusammengeführt, sondern vorab gemischt in Flaschen von extern bezogen.

Parallel zu den Vorbereitungen am Prüfstand wurde ein Simulationsmodell des Versuchsmotors im Programm *GT Power* von *Gamma Technologies* erstellt. Die eindimensionale Modellierung der Prozesse im Motor ermöglicht es, schnell, effizient und mit ausreichender Genauigkeit die für das LOHC-System relevanten Daten zu berechnen und Wirkungsgradanalysen durchzuführen. Eine Kalibrierung der Simulation mit Messdaten ist notwendig, um verlässliche Aussagen zu erhalten. Dieser Schritt ist ebenfalls für Anfang kommenden Jahr geplant.

Als weiterführende Innovation wurde über den ursprünglich geplanten Kerninhalt des Projektes hinaus ein Hochdruck-Gas-Kraftstoffsystem fertiggestellt (s. Abbildung), das nun Einblaseversuche mit Erdgas und Wasserstoff bis 500bar in der Hochdruck-Spraykammer bei Motorbedingungen bis 100 bar und 1000 K ermöglicht. Ziel ist die Erforschung neuer Gasbrennverfahren zur Steigerung der Effizienz von Gasmotoren über Brennverlaufsformung durch Mischungskontrolle sowie die Vermeidung von klopfender Verbrennung bei hohen Lasten. Die Hochdruck-Einblasung kann günstig mit Vorkammer-Zündkonzepten für hochverdünnte Brennverfahren kombiniert werden, die parallel in der Arbeitsgruppe erforscht und entwickelt werden.



Abbildung 14: Hochdruck-Kraftstoffsystme für Methan und Wasserstoff bis 500 bar

Der zentrale, das Projekt bearbeitende Mitarbeiter ist als Nachfolger von Moritz Schumacher Alexander Durst. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an den Prüfständen und in der Messtechnik haben im Projektjahr 2018 Lukas Weiß und Andreas Peter die Arbeiten wesentlich unterstützt.

4 Schlussworte

Das Projekt Speicher B ist gut in die zweite Förderphase gestartet. Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen beteiligten Lehrstühlen und Institutionen funktioniert sehr gut und wird durch die gemeinsamen Büroräume im 4. OG des EnCN noch verstärkt. Über das Teilprojekt 2: Effiziente Wasserstofflogistik bestehen viele Anknüpfungspunkte an das Kopernikus P2X-Projekt des BMBF sowie an das Projekt „Emissionsfreier und stark emissionsreduzierter Bahnverkehr auf nicht-elektrifizierten Strecken“ des Helmholtz-Instituts Erlangen-Nürnberg. Dies stärkt den LOHC-Forschungsstandort Großraum Nürnberg-Fürth-Erlangen enorm und erhöht sowohl die Schlagkraft als auch die Sichtbarkeit der gemeinsamen Forschungstätigkeiten. Der Energiecampus und das geförderte Forschungsprojekt Speicher B sind hier als verbindendes Element zwischen den verschiedenen Aktivitäten der Akteure zu sehen.

5 Vorträge & Poster 2018

- [1] H. Jorschick; P. Preuster; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Hot Pressure Swing Reactor Concept for Stationary Hydrogen Storage Applications. World Hydrogen Energy Conference, 2018
- [2] S. Dürr; L. Wagner; P. Preuster; P. Wasserscheid. Hydrogen Storage via Pressure Swing Reaction - from Batch to Continuous Reactor Design. World Hydrogen Energy Conference, 2018
- [3] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Konzept zur Dehydrierung eines chemischen Wasserstoffträgers unter Verwendung eines Brenners. Thermodynamik-Kolloquium, 2018 (Poster)
- [4] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Entwicklung und Optimierung von erdgas-beheizten Wasserstoff-Freisetzungsanlagen für LOHC-Materialien. EnCN Jahreskonferenz, 2018 (Vortrag)
- [5] V. Grimm. Regional Differentiation of Renewable Energy Subsidies: A Long Term Assessment. iSEnEC, 2018
- [6] V. Grimm. Podiumsdiskussion – Wie können Innovationen im Energiebereich gefördert werden? dena SET Lab Dialogveranstaltung am BMWI, 2018
- [7] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ÖGOR Workshop Wien, Wien, 17.05.2018
- [8] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 12.06.2018

- [9] V. Grimm. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. ERPG Seminar, Cambridge, 12.06.2018
- [10] V. Grimm. Wie viel Dezentralität braucht die Energiewende? EnCN Jahreskonferenz, Nürnberg, 13.12.2018
- [11] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. ENERDAY, 2018
- [12] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. 41st IAEE International Conference, 2018
- [13] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. iSENEC, 2018
- [14] P. Runge. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Aktionstage Nachhaltigkeit, 2018
- [15] P. Runge. Synthetische Kraftstoffe aus Vorzugsregionen für erneuerbare Energien als Beitrag zur deutschen Energiewende. EnCN Jahreskonferenz, 2018
- [16] P. Runge. Synthetische Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft. Klimaschutzwoche, 2018
- [17] C. Sölch. Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035. Bavarian Berlin Energy Research (BB²), 2018

6 Veröffentlichungen 2018

- [1] 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, 1078-1093, 2019
- [2] Ambrosius, M., Grimm, V., Sölch, C., & Zöttl, G. (2018). Investment Incentives For Flexible Demand Options Under Different Market Designs. *Energy Policy*, 118, 372 – 389, 2018
- [3] Ambrosius M., Grimm V., Kleinert T., Liers F., Schmidt M., Zöttl G.: Endogenous Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multilevel Optimization with Graph Partitioning, 2018 (Techreport)
- [4] H. Jorschick; P. Preuster; S. Dürr; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Operational stability of a LOHC-based hot pressure swing reactor for hydrogen storage. *Energy Technology*, 2018, DOI: 10.1002/ente.201800499
- [5] H. Jorschick; P. Preuster; A. Bösmann; P. Wasserscheid. Charging a Liquid Organic Hydrogen Carrier System with H₂/CO₂ Gas Mixtures. *ChemCatChem*, 2018, DOI: 10.1002/cctc.201800960
- [6] T. Rude; A. Bösmann; P. Preuster; P. Wasserscheid; W. Arlt; K. Müller. Resilience of Liquid Organic Hydrogen Carrier Based Energy-Storage Systems. *Energy Technology*, 2018, 6(3), pp. 529-539
- [7] P. Preuster; Q. Fang; R. Peters; R. Deja; V. N. Nguyen; L. Blum; D. Stolten; P. Wasserscheid. Solid oxide fuel cell operating on liquid organic hydrogen carrier-based hydrogen – making full use of heat integration potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(3), pp. 1758-1768

7 Patente 2018

- [8] C. Paetz, B. Melcher, M. Schneider, A. Bösmann, D. Geburtig, P. Preuster, P. Wasserscheid. Vorrichtung und Verfahren zum Bereitstellen von Wasserstoffgas.
- [9] D. Teichmann, A. Bösmann, D. Geburtig, P. Preuster, P. Wasserscheid, K. Müller, K. Mayrhofer, G. Sievi, „Vorrichtung und Verfahren zum Erzeugen von elektrischem Strom“. i

W1-Professur „Energieinformatik“

1 W1-Professur „Energieinformatik“

Die Besetzung der Juniorprofessur für Energieinformatik erfolgte bereits Anfang 2016 durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner. Im Jahr 2018 wurde eine Vielzahl von Projekten in den Forschungsschwerpunkten Energiesystemanalyse, Elektromobilität und Steuerung intelligenter Energiesysteme bearbeitet. Im Bereich der Energiesystemanalyse erfolgten innerhalb des BMWi-geförderten Projekts „KOSiNeK - Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext“ gute Fortschritte bei der Entwicklung des Simulationsmodells. Die im Jahr 2017 begonnene Implementierung des Regionenmodells zur Abbildung der Einspeisung aus dezentralen erneuerbaren Energien sowie der Stromnachfrage auf Ebene von Landkreisen und kreisfreien Städten konnte Mitte des Jahres fertiggestellt werden [1], [2]. Darüber hinaus wurde ein detailliertes Marktmodell in das Simulationsmodell integriert [3]. In Kooperation mit der University of Calgary wurde eine ältere Version des Simulationsmodells auf das Energiesystem der kanadischen Provinz Alberta angepasst, um den Einfluss einer großen Anzahl von Elektrofahrzeugen auf das dortige Energiesystem studieren zu können. Im Forschungsbereich Elektromobilität wurden Untersuchungen durchgeführt, inwiefern eine Flotte von Elektrofahrzeugen im virtuellen Kraftwerksverbund Systemdienstleistungen (insbesondere Primärregelleistung) bereitstellen kann [4]. Zusätzlich wurde anhand von empirischen Daten das Kosten- und Umweltpotential von Taxi-Ridesharing ermittelt. In einer Kooperation mit Development Autonomous Driving der AUDI AG wurde die Ausbalancierung und Flottenauslegung von Mobility-on-Demand-Netzwerken mit Leerfahrten und Preisanreizen untersucht. Für die schnelle Erkundung des Designraums wurde dazu eine Methode mit kombinierter Simulation, Optimierung und Warteschlangennetzwerkanalyse entwickelt [5]. Im Bereich der Steuerung von intelligenten Energiesystemen konnten ebenfalls gute Fortschritte erzielt werden. So gelang es mittels Reinforcement Learning Steuerungsstrategien für stationäre Batteriespeicher in Privathaushalten zu entwickeln [6], [7].

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem Gebiet der Energieinformatik wird dabei einerseits durch die im Wintersemester angebotene Lehrveranstaltung Modellierung, Optimierung und Simulation von Energiesystemen (MOSES) sowie der im Sommersemester angebotenen Lehrveranstaltung Smart Grids und Elektromobilität (SGEM) sichergestellt. Beide Lehrveranstaltungen werden von Herrn Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner angeboten und weisen einen interdisziplinären Charakter auf.

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

2 Veröffentlichungen 2018

- [1] D. Steber; Ch. Thurner; Th. Graber; M. Pruckner; M. Luther; A. Martin; R. German. Combined Optimization, Simulation and Grid Analysis of the German Electrical Power System in an European Context, International Conference on Integration of Sustainable Energy, Nürnberg, 2018.
- [2] D. Steber; B. Hümmer; Ch. Gürtner; R. German, M. Pruckner. Ein Regionenmodell zur Herleitung der lokalen elektrischen Residuallast und thermischen Last in Deutschland, 15. Symposium Energieinnovation, Graz, 2018.
- [3] D. Steber; J. Hübler; M. Pruckner. A Comprehensive Electricity Market Model Using Simulation and Optimization Techniques, Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Göteborg, 2018.
- [4] J. Schlund; R. Steinert; M. Pruckner. Coordinating E-Mobility Charging for Frequency Containment Reserve Power Provision, Proceedings of the 9th International Conference on Future Energy System, Karlsruhe, 2018.
- [5] P. Bazan; A. Djanatliev; Ch. Lauer; M. Pruckner; R. German. Rebalancing and Fleet Sizing of Mobility-on-Demand Networks with Combined Simulation, Optimization and Queueing Network Analysis, Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, Göteborg, 2018.
- [6] N. Ebell; M. Pruckner. Coordinated Multi-Agent Reinforcement Learning for Swarm Battery Control, Proceedings of the 31st IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec, 2018.
- [7] N. Ebell; F. Heinrich; J. Schlund; M. Pruckner. Reinforcement Learning Control Algorithm for a PV-Battery-System providing Frequency Containment Reserve Power, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Control and Computing Technologies for Smart Grids, Aalborg, 2018.



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:



Bayerische Staatsregierung

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: 31.12.2018

© Bildrechte:
EnCN, EnCN/Kurt Fuchs, FAU, Fraunhofer IIS, TH-
Nürnberg, HS Ansbach, Fraunhofer IISB, Fraunhofer IBP