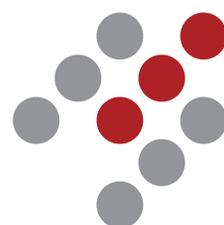




FORSCHUNGSBERICHT 2017



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

FORSCHUNGSBERICHT

2017

Gegründet 2011.

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

Denken. Forschen. Handeln.

Vorwort



Die Metropolregion Nürnberg ist heute ein deutschlandweit herausragender Standort für die Energiewirtschaft und die Energieforschung. Der Energie Campus Nürnberg – im Jahr 2011 ins Leben gerufen als Kooperationsprojekt zwischen sechs renommierten Forschungseinrichtungen – vereint nachgewiesene Exzellenz in der Forschung entlang der Kompetenzfelder der ansässigen Unternehmen. Damit bieten sich beste Voraussetzungen für interdisziplinäre Spitzenforschung im Bereich Energie mit dem Anspruch, nicht nur neue Technologien zu entwickeln und zukünftige Megatrends im Energiesektor zu beleuchten, sondern auch den Technologietransfer in die (regionale) Wirtschaft zu realisieren und die Innovationskraft der Region spürbar zu stärken.

Aus den elf Projekten der ersten Förderperiode (2012-2016) sind nun sechs Forschungsbereiche entlang der Energiekette entstanden, in denen sowohl die vom Freistaat geförderten Projekte als auch weitere Drittmittelprojekte gemeinsam bearbeitet werden. Die Kooperation ist in zweierlei Hinsicht einzigartig: Die Kooperation der verschiedenen Institutionen in einem Verbund ohne eigene Rechtsform ermöglicht eine unkomplizierte und von Inhalten getriebene Zusammenarbeit. Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gelingt im EnCN zudem über die Disziplinengrenzen hinweg eine Zusammenarbeit auf höchstem wissenschaftlichen Niveau. Dies eröffnet die Chance, in einmaliger Art und Weise Wissen aus der Forschung in die Anwendung zu bringen und Konzepte für die nachhaltige Energieversorgung der Zukunft zu erarbeiten. Der Energie Campus Nürnberg leistet so einen Beitrag zur Energiewende, regional, national und international.

Die Schlagkraft des EnCN wird von dem Zusammenspiel dreier Säulen getrieben: Erstens, ein umfassendes Angebot an Netzwerkaktivitäten und Veranstaltungen unter einem gemeinsamen Dach; zweitens, die wissenschaftliche Kooperation in zukunftsweisenden Feldern der Energieforschung zwischen den Einrichtungen über die Grenzen der Disziplinen hinweg und drittens, Technologietransfer und Gründeraktivitäten aus dem EnCN heraus und im Umfeld des EnCN.

Dies ist der erste Jahresbericht der zweiten Förderperiode des Energie Campus. Er zeigt, dass der EnCN in seiner neuen Struktur das Potential der institutionenübergreifenden und interdisziplinären Energieforschung optimal nutzt. In einem gemeinsamen Jahresrückblick aller Forschungsbereiche beleuchtet der vorliegende Bericht die Highlights aus der Forschung sowie das große Spektrum der gemeinsamen Aktivitäten im Jahr 2017. Die Jahresberichte der einzelnen

Forschungsbereiche demonstrieren dann den beeindruckenden Fortschritt in den einzelnen Projekten schon im ersten Jahr der aktuellen Förderperiode. Neben wegweisenden Technologischen Entwicklungen, zum Beispiel im Bereich der druckbaren Photovoltaik oder der Wasserstofflogistik sticht die Arbeit am EnCN durch eine Betrachtung der Zukunftstechnologien im Systemkontext mithilfe von Energiemarktmodellen heraus. Unternehmenspartner profitieren so nicht nur im Rahmen von technologiespezifischen Kooperationen, sondern auch durch die Möglichkeit, die Chancen von Geschäftsmodellen umfassend zu bewerten.

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 zahlreiche enge Partner, mit denen er unter anderem Wissensaustausch betreibt sowie Veranstaltungen und Forschungsprojekte durchführt.

Die Zusammenarbeit der verschiedenen Institutionen im und rund um den EnCN ist eine Erfolgsgeschichte und ein Alleinstellungsmerkmal für die Metropolregion Nürnberg. In den vergangenen Jahren hat die Vernetzung zwischen den Wissenschaftsorganisationen und zwischen Wissenschaft und Wirtschaft stetig zugenommen. In der aktuellen Förderphase des EnCN wird das Netzwerk weiter ausgebaut. Zukünftig ist die Integration auch weiterer Partner denkbar und wünschenswert.

Eine Herausforderung der aktuellen Förderperiode bildet neben den laufenden Aktivitäten auch die Entwicklung einer Zukunftsperspektive für den EnCN, die den Mehrwert der Aktivitäten für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik erhält und weiter ausbaut. Denn die Energieforschung in Bayern ist ohne den EnCN nicht mehr denkbar.

Dezember 2017



Prof. Dr. Veronika Grimm

Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung

Forschungspartner im EnCN



Gefördert durch

Bayerische Staatsregierung



Unterstützt durch



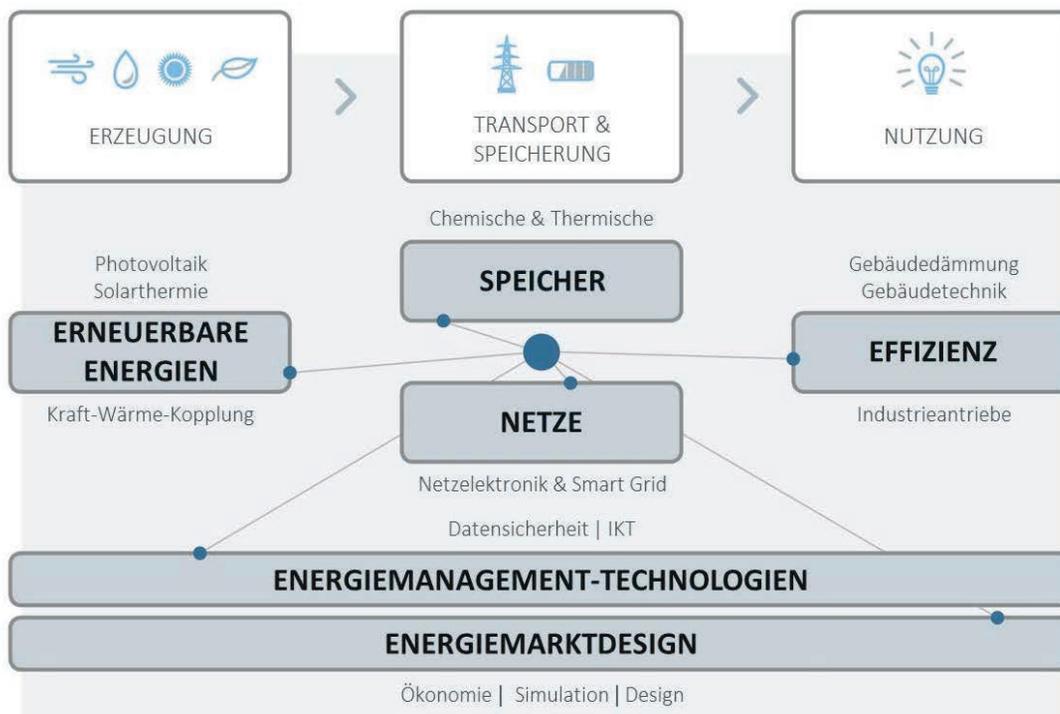
Inhaltsverzeichnis

HIGHLIGHTS 2017	6
ÜBERBLICK ÜBER DEN EnCN	12
Organisation des EnCN	13
Standort und Netzwerk.....	19
Jahresrückblick 2017.....	21
Ausblick 2018.....	31
EnCN GESCHÄFTSSTELLE.....	32
FORSCHUNGSBEREICH EFFIZIENZ.....	38
Projekt Effizienz	39
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMANAGEMENT-TECHNOLOGIEN	72
Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik	73
FORSCHUNGSBEREICH ENERGIEMARKTDESIGN	76
Projekt Energiemarktdesign	77
W1-Professur „Optimierung von Energiesystemen“	93
FORSCHUNGSBEREICH ERNEUERBARE ENERGIEN	98
Projekt Erneuerbare Energietechnologien im urbanen Umfeld	99
W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleiter“	112
FORSCHUNGSBEREICH NETZE	116
Projektübersicht Netze	117
FORSCHUNGSBEREICH SPEICHER	128
Projekt Speicher A – Speicher mit Systemrelevanz bis 2022	129
Projekt Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022	151
W1-Professur „Energieinformatik“	165

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



Ziele des EnCN

1. Bündelung der Expertise und Stärkung der Innovationskraft in der Metropolregion, um disziplinübergreifend große Herausforderungen der Energieforschung zu meistern und die Energiewende voranzubringen.
2. Gemeinsam Wege für die Transformation unseres Energiesystems zu einer regenerativen Energieversorgung aufzeigen.
3. Die dafür notwendigen Technologien entwickeln und in die Anwendung bringen.
4. Aufbau von strategischen Partnerschaften, regional, national und international.
5. Eine dauerhafte Kooperation der beteiligten Institutionen in der Energieforschung etablieren.

Highlights 2017

EFFIZIENZ



Herstellung nanofaserverstärkter Silica-Aerogele zur thermischen Isolierung von Bau- und Dämmstoffen

In der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ von Prof. Dr. Krcmar werden mit Nanofasern verstärkte Silica-Aerogele synthetisiert. Die Wärmeleitfähigkeit der Aerogel-Monolithe wird auf Werte zwischen $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,014 - 0,02 \text{ W/(mK)}$ geschätzt. Damit handelt es sich um den besten unbrennbaren Dämmstoff der Welt. Die fragilen Monolithe werden in die Kammern hochwärmedämmender Hochlochziegel eingeschoben.

>> Gebäude



Fertigstellung der Herzo Base – Energiespeicherhäuser

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ der Arbeitsgruppen Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Kießling und Prof. Dr. Krcmar wurde Ende 2017 ein Komplex aus acht hochgedämmten Ziegelhäusern fertiggestellt und teilweise bereits von den Käufern bezogen. Im Januar 2018 startete das Intensiv-Monitoring der innovativen Baustoffe und der neuartigen Anlagentechnik.

>> Gebäude



Neue Echtzeit-Berechnungsplattform entwickelt

In der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte“ von Prof. Dr. Dietz wurde eine Echtzeit-Berechnungsplattform zur universellen Ansteuerung von leistungselektronischen Systemen auf Basis einer „System-on-a-Chip“ (SoC) Lösung mit Mikrocontroller und Field Programmable Gate Array (FPGA) entwickelt. Im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit der Universidad de Santiago de Chile (USACH) und der Technischen Universität München soll die Echtzeit-Berechnungsplattform in einer „Community“ übergreifend an mehreren Universitäten vorangetrieben werden.

>> Industrie



Prozessvisualisierung in der Aluminium-Druckgussindustrie

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Schlüter hat bei den Kooperationspartnern pressmetall Gunzenhausen GmbH und ZF Gusstechnologie GmbH eine Prozessvisualisierung aktueller Maschinendaten implementiert, mit der kritische Betriebszustände und Maschinenausfälle schneller erkannt werden können. Ein auf dieser Basis verbesserter Prozessablauf ermöglicht mehr Energieeffizienz bei gleichzeitig gesteigerter Produktivität.

>> Industrie

ENERGIEMANAGEMENT TECHNOLOGIEN

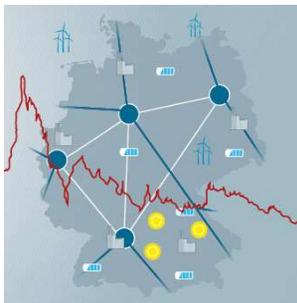


IEEE Konferenz in Nürnberg

200 Wissenschaftler aus aller Welt trafen sich 2017 in Nürnberg, um neueste Ergebnisse und Entwicklungen auf dem Gebiet der dezentralen Energieversorgung mittels Gleichstromnetzen „DC Microgrids“ zu präsentieren und zu diskutieren. Bernd Wunder vom LEE/IISB war als Technical Chairman für das Gesamtprogramm verantwortlich. Die große internationale Sichtbarkeit der Arbeiten am Fraunhofer IISB und LEE ermöglichte es uns, die zweite Konferenz nach dem Auftakt in Atlanta/USA, hierher nach Nürnberg zu holen.

[>> EMT](#)

ENERGIEMARKTDESIGN



Gutachten „Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung“

In einem Gutachten für die Monopolkommission wird das EnCN-Strommarktmodell genutzt, um die langfristigen Auswirkungen der Rahmenbedingungen am Strommarkt auf Investitions- und Produktionsanreize in Netz- und Erzeugungskapazitäten zu analysieren. Im Fokus stehen dabei verschiedene Szenarien für den regionalen Zubau von EE-Anlagen. Die Studie zeigt, dass verbrauchsnahe, dezentrale Standorte im Vergleich mit den aktuell avisierten – vornehmlich am Ertrag der Anlagen orientierten – Standorten zu einer höheren Systemeffizienz führen. Regional differenzierte EE-Förderung kann lastnahe Standorte ermöglichen.

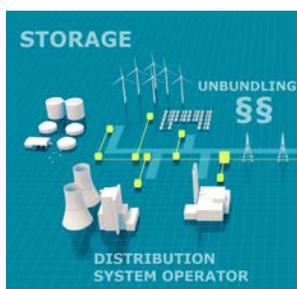
[>> EMD](#)



Endogene Preiszonen im deutschen Strommarkt

Im Rahmen des Forschungsprojekts „endogene Preiszonen“ wird mithilfe des EnCN-Strommarktmodells die wohlfahrtsmaximierende Zonierung des deutschen Strommarktes bestimmt und deren Auswirkungen auf Investitionsanreize untersucht. Dabei zeigt sich, dass sich durch die Implementierung optimaler Preiszonen hohe Wohlfahrtsgewinne erzielen lassen und dass die optimale Zonierung von der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität abhängt. Diese Arbeit geht in ein Dissertationsvorhaben ein, das mit dem Fakultätsfrauenpreis der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ausgezeichnet wurde.

[>> EMD](#)



Studie zu Speicherbetrieb und Entflechtung auf Verteilernetzebene

Die Studie untersucht Vertrags- und Ausschreibungsszenarien, 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 insbesondere die rechtliche Umsetzbarkeit der Szenarien. Diese wird durch das Entflechtungsregime, d.h. der Trennung von Markt und Netz geprägt, das nach dem Änderungsvorschlag der Kommission Verschärfungen unterliegen würde.

[>> EMD](#)



Marktdesign im Smart Grid

Im Projekt Smart Grid Solar wird das Zusammenspiel von Netzen, Erzeugern, Speichern und Verbrauchern in Smart Grids analysiert und untersucht, welche Marktregeln zusammen mit den wirtschaftspolitischen Steuerungsmechanismen zu den richtigen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure führen. Die Anwendung des entwickelten mathematischen Optimierungsmodells auf das Verteilnetz in Epplas zeigt dort ein Effizienzsteigerungspotential von 10% der jährlichen Gesamtsystemkosten, welches durch verschiedene Marktdesigns mehr oder weniger genutzt werden kann.

>> EMD



©Shutterstock 211310194

Studie zur Investitionsbereitschaft in Kleinspeichieranlagen

Auf Basis umfangreicher Umfragedaten von Haushalten mit Solaranlagen wurde die Investitionsbereitschaft in Kleinspeichieranlagen untersucht. Mithilfe korrelationsbasierter Clusteralgorithmen konnten dabei vier Kundentypen mit unterschiedlichen Anspruchshaltungen identifiziert werden: finanziell, sicherheits-, idealistisch und multilateral orientierte Speicherkunden. Die Ergebnisse binärer Logit-Regressionen deuten zudem darauf hin, dass Investitionsbereitschaft und -treiber in den vier Gruppen divergieren und zielgruppenspezifische Fördermaßnahmen die vermehrte Nutzung von Kleinspeichieranlagen unterstützen können.

>> EMD



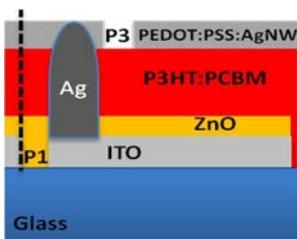
©Shutterstock 131120717

Theoretische Analysen zur Eindeutigkeit von Strommarktgleichgewichten

Für die Entwicklung der mathematischen Lösungsverfahren zur Analyse von Strommarktmodellen ist die Kenntnis 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 beachten. Diese Abschlussarbeit von Frau Krebs erhielt den EnCN-Energiepreis 2017 und mündete in zwei aktuell sich in der Begutachtung befindlichen Publikationen.

>> EMD

ERNEUERBARE ENERGIEN



Unsichtbarer Interconnect

Uns ist es gelungen, die Verschaltung (Engl.: „interconnection“) einzelner Dünnschicht-solarzellen zu einem Modul rein drucktechnisch herzustellen. Die obere und die untere Elektrode werden dabei mittels Tintenstrahl Druck über eine opake Silberbrücke im μm -Maßstab verbunden, wodurch eine für das Auge nahezu unsichtbare Modulverschaltung ermöglicht wird.

>> EET



Solar-Wrist

Das „Solar-Wrist“-Band ist für den Wearable-Bereich konzipiert und kann auf Grund der flexiblen Gestaltung als Armband oder als Band für eine Smartwatch bzw. einen Fitnessstracker genutzt werden. Es produziert während des Tragens Strom (sowohl bei direkter Sonneneinstrahlung als auch in Räumen) und kann somit die Zeit bis zum nächsten Aufladen deutlich verlängern bzw. im Idealfall das Gerät komplett autark betreiben.

>> EET



Nicht-Fulleren-Akzeptoren

Durch den Austausch des üblicherweise verwendeten Fulleren-Akzeptors (PCBM) durch ein neuartiges Nicht-Fulleren-Akzeptormolekül (O-IDTBR) ist es uns gelungen, die Moduleffizienz von P3HT-Modulen (2,4%) um einen Faktor >2 auf 5,0% zu steigern. Diese neue Materialkombination zeigt zudem nicht nur eine erhöhte Effizienz, sondern auch eine verbesserte Lebensdauer.

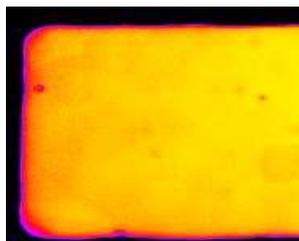
>> EET



Additiv zur Lebenszeitverlängerung

Die Beimischung kleiner Mengen des Antioxidationsmittels $\text{Ni}(\text{dtc})_2$ zur aktiven Schicht einer organischen Solarzelle hat eine positive Auswirkung auf deren Widerstandsfähigkeit gegen Photooxidation. Der Stabilisator schützt die aktiven Materialien vor radikalischen Angriffen und verlängert dadurch die Lebensdauer der Solarzellen.

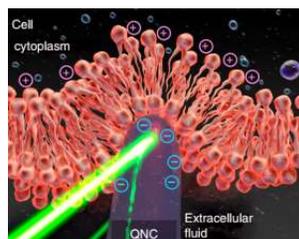
>> EET



Photolumineszenz als bildgebende Prozesskontrolle

Optische Messverfahren erlauben eine Qualitätskontrolle direkt nach der Abscheidung der aktiven Schicht noch weit vor der Fertigstellung einer Solarzelle. Die Intensität der Photolumineszenz gibt eine direkte Aussage zur Fähigkeit des Films freie Ladungsträger zu erzeugen. Durch die Verwendung einer besonders sensitiven und hochauflösenden Photolumineszenz Kamera können außer Materialinhomogenitäten auch kleinste Defekte sichtbar gemacht werden, die sonst nur am fertigen Bauteil erkennbar sind.

>> EET



Nanostrukturen für eine künstliche Retina

In Solarzellen werden in einem Halbleiter über Photonen Elektronen-angeregt, welche aufgrund eines eingebauten Potentials zu einem äußeren Stromfluss führen. Hier wurden Halbleiternanomaterialien verwendet um damit unter Photonenanregung Ströme durch Zellmembranen fließen zu lassen, so ähnlich wie auf der Netzhaut Lichtteilchen Ströme im Sehnerv anregen. In dieser Arbeit wurden Ströme in Zellen stimuliert, die keinerlei Lichtempfindlichkeiten aufweisen, sondern erst mit den angefügten Nanoteilchen lichtempfindlich gemacht werden.

>> EET

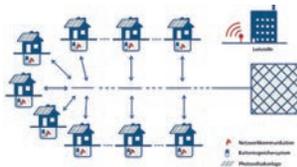
NETZE



IEEE PESS

Innovative Forschung für eine nachhaltige elektrische Energieversorgung – dies ist seit 2009 das Motto einer Konferenz für Studierende, um ihre Forschungsarbeiten zu präsentieren. Die zweitägige Konferenz „Power and Energy Student Summit“ unter dem Dach der IEEE Power and Energy Society – German Chapter – fand in diesem Jahr in Nürnberg am EnCN statt und wurde vom Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme ausgerichtet.

[>> Netze](#)



SWARM – Storage With Amply Redundant Megawatt

Angesichts der zunehmenden installierten Leistung von erneuerbaren Energieanlagen werden die heutigen und zukünftigen elektrischen Energiesysteme vor große Herausforderungen gestellt. Künftig werden nicht nur konventionelle Großkraftwerke zur Frequenzregelung beitragen, sondern zunehmend auch Kleinspeicherverbunde. Zur Bereitstellung von Primärregelleistung wurde ein erster Prototyp fertiggestellt. In diesem Zusammenhang werden Analysen zum Betriebsverhalten von elektrischen Energiesystemen bzgl. der Integration dezentral verteilter Batteriespeichersysteme im stationären und dynamischen Betrieb durchgeführt.

[>> Netze](#)

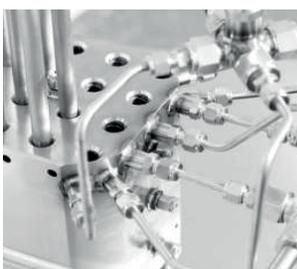


Versuchsanlage hybrides Energiespeichernetz am EnCN

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](#)

SPEICHER



Reaktorprototyp für dynamische Methansynthesen

Im Rahmen des Teilprojekts dynamische Synthesen wurde ein neuartiges Reaktorkonzept für dynamische Synthesen entwickelt und bereits ersten Probetrieb experimentell untersucht. Aufgrund des strukturiert gekühlten Reaktordesigns kann das thermische Management die stark exothermen Synthesereaktionen auch im transienten Betrieb sicher kontrollieren. Dies ermöglicht den Einsatz der kompakten Reaktoren in dezentralen Power-to-Gas Konzepten zum Ausgleich fluktuierender Stromerzeugung.

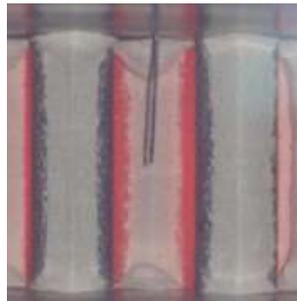
[>> Speicher](#)



Dynamischer Dampferzeuger Teststand

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik wurde im Rahmen des TP 2 (Spitzenlastfähige Hochtemperaturspeicher) ein Prototyp aufgebaut, um die dynamische Dampferzeugung mittels Hochtemperatur-Heatpipes zu untersuchen. Um den Jahreswechsel erfolgte die Inbetriebnahme und der Teststand bringt wertvolle Erfahrungen für die Konstruktion und die dynamische Betriebsweise des 2018 zu errichtenden Heatpipe-Carbonatspeichers. Dieser ist die erste Anlage dieser Art im Pilotmaßstab und soll einen entscheidenden Beitrag zur Flexibilisierung von Dampfkraftwerken leisten.

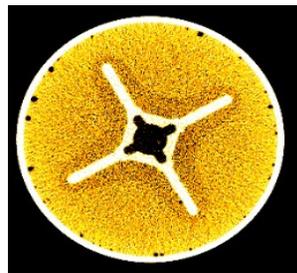
[>> Speicher](#)



Spitzenlastfähige CaO – CaCO₃ Hochtemperaturspeicher

Isotherme Hochtemperaturspeicher für Einsatztemperaturen im Bereich 800 – 900°C auf Basis von CaO –CaCO₃ System bieten höchste Speicherdichten und erlauben beispielsweise die Flexibilisierung der Dampferzeugung in der bestehenden Kraftwerksinfrastruktur. Wir bieten Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen zu Systemdesigns und zum Wärmemanagement für diese Speichertechnologie.

[>> Speicher](#)



Latente Wärmespeicherung mit MgCl₂·6H₂O

Durch die Verwendung der Computertomographie konnten neue Einblicke in thermische Energiespeicher auf Basis von Magnesiumchloridhexahydrat gewonnen werden. Ein Laboraufbau bestätigt das Potential für eine Einsatztemperatur bei 116 C. Der Schmelz- und Kristallisationsvorgang konnten im Computertomographen genauer analysiert. Dies dient als Grundlage für die Designoptimierung mittels einer Computersimulation und erlaubt ein besseres Verständnis der Latentwärmespeicherung.

[>> Speicher](#)



Erster Prototyp einer Dehydriereinheit mit Porenbrenner in Betrieb genommen

In Zusammenarbeit mit den Partnern im Teilprojekt „Effiziente Wasserstofflogistik“ wurde am LTT eine Dehydriereinheit entworfen, die direkt mit einem Porenbrenner beheizt werden kann. Dieser Porenbrenner bietet einen sehr breiten Leistungsbereich und sehr gute Leistungen um die anspruchsvolle Dehydrierung zu betreiben. Die Einheit wurde zunächst in Wärmeübertragungsversuchen in Betrieb genommen und wird im kommenden Jahr auf ihre Eigenschaften als Dehydrierer untersucht.

[>> 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.



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, 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

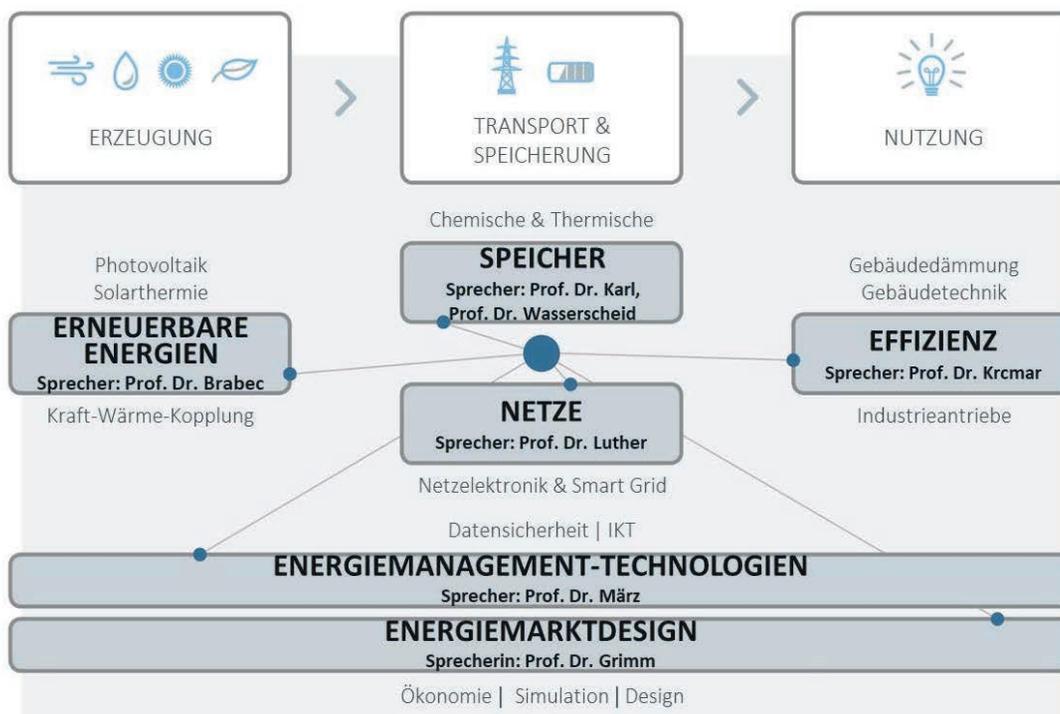


Abbildung 2 – Überblick über die Forschungsbereiche entlang der Energiekette

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 5 vom Freistaat Bayern geförderten Projekte sind Erneuerbare Energien, Energiespeicher mit Systemrelevanz bis 2022, Energiespeicher mit Marktreife bis 2022, Effiziente Energienutzung und Energiemarktdesign. Die Projekte sind noch einmal in 18 Teilprojekte mit insgesamt 44 Teilprojektleitern eingeteilt. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend und disziplinübergreifend organisiert. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilweise werden Arbeiten jedoch an anderen Orten durchgeführt, weil die Infrastrukturausstattung im EnCN nicht für alle Aktivitäten ausreichend ist.

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

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

Wissenschaftliche Leitung (WL)

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

Vorsitzende der

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

Sprecher der Forschungsbereiche

Prof. Dr. Christoph Brabec (Erneuerbare Energien; FAU/ZAE)

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
Prof. Dr. Arno Dentel	THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik	Effizienz
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 ZAE, Bereich Erneuerbare Energien	Erneuerbare Energien, Speicher
Prof. Dr. Arno Dentel	THN, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik	Effizienz
Prof. Dr. Armin Dietz	THN, Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik	Effizienz
Dr. Marius Dillig	FAU, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik	Speicher
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	ZAE, Bereich Erneuerbare Energien	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

Name	Institution	Forschungsbereich
Prof. Dr. Frauke Liers	FAU, Professur für Diskrete Optimierung in den Ingenieurwissenschaften	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Matthias Luther	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme	Netze
Dirk Malipaard	FhG IISB, Energiesysteme	Energiemanagementtechnologien
Prof. Dr. Alexander Martin	FAU, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik FhG IIS, Analytics	Energiemarktdesign
Prof. Dr. Martin März	FAU, Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik FhG IISB, Energieelektronik	Energiemanagementtechnologien
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. Karsten Müller	FAU, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik	Speicher
Dr. Patrick Preuster	FAU, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	Speicher
Prof. Dr. Marco Pruckner	FAU, Lehrstuhl für Informatik 7	Speicher
Karlheinz Ronge	FhG IIS, Vernetzte Systeme und Anwendungen	Energiemanagementtechnologien
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	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. Sie ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Sprecherin bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Auch bündelt sie 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: Rudolf Heindel

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	Prof. Dr. Christoph Brabec (FAU/ZAE) Dr. Michael Fraas (Wirtschaftsreferent 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 und Medien, Energie und Technologie* sowie an das *Bayerische Staatsministerium für Bildung und Kultus, 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.

Das finanzielle Reporting 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 siebte Jahresbericht und umfasst den Berichtszeitraum 1.1.2017 bis 31.12.2017. Die Jahresberichte für die Jahre 2011 bis 2016 können auf Anfrage über die Geschäftsstelle des EnCN bezogen werden.

Zahlen und Fakten

Die zweite Förderperiode ist sehr gut angelaufen. Insgesamt arbeiten 123 Forscherinnen und Forscher in den sechs Forschungsbereichen. Die Forschungsarbeiten verteilen sich auf eine Forschungsfläche von 5.200 qm und 30 Labors und Technikumsräume. Auf den 540 qm Veranstaltungsflächen fanden 2017 über 80 Workshops, Seminare, Vorlesungen, Diskussionsrunden und Informationsveranstaltungen statt.

Die Partner am EnCN haben 2017 insgesamt mehr als 4 Mio. € an Drittmitteln eingeworben. Diese Mittel verteilen sich auf mehr als 50 einzelne Projekte mit insgesamt mehr als 100 Partnern aus Industrie und Wissenschaft.

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 2017



Veranstaltungen

Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft

Auf der Handelsblattagung 2017 in Berlin war der EnCN sowohl im Konferenzteil als auch auf der Ausstellung aktiv. Prof. Dr. Veronika Grimm, Projektkoordinatorin Strommarktdesign, erörterte im Expertengespräch mit Dr. Patrick Graichen (Agora Energiewende) das Thema „Investitionen im Strommarkt: Was kostet die Energiewende?“. In der begleitenden Ausstellung präsentierte der EnCN seine Forschungskompetenzen und Referenzen, um zum einen in Gesprächen die Bekanntheit des EnCN zu erhöhen und zum anderen potentielle Projektpartner für eine Zusammenarbeit zu gewinnen. 2018 wird der EnCN erneut auf der Handelsblattagung vertreten sein.



Abbildung 6 – Impressionen von der Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft 2017 in Berlin

Hannover Messe

Auf der Hannover Messe war der EnCN erneut als Aussteller vertreten. Auf dem Gemeinschaftsstand von Bayern Innovativ in Halle 2 stellten die Forscherinnen und Forscher Technologien und Produkte aus der aktuellen Forschung vor. Auch Bayerns Wirtschaftsministerin Ilse Aigner besuchte unseren Stand und informierte sich unter anderem über neu entwickelte Batteriemodule der EnCN-Ausgründung CEUS.



Abbildung 7 – Ilse Aigner besucht den EnCN-Stand auf der Hannover Messe

Konferenz in Doha

Am 03.04.17 fand organisiert von Prof. Dr. Arlt und auf Einladung der Texas A&M University at Qatar ein Symposium unter dem Titel „Recent Advances in Renewable Energy Technologies“ statt. Die Ziele waren dabei ein gegenseitiger Wissensaustausch mit lokalen Wissenschaftlern sowie die Identifikation von möglichen Projekten in der Region. Unter den Teilnehmern waren unter anderem Mitarbeiter der Qatar Foundation, einem wichtigen Geldgeber für Forschungsprojekte. Für den EnCN vor Ort waren Prof. Dr. Arlt, Prof. Dr. Grimm, Dr. Hauch, Prof. Dr. Krcmar, Prof. Dr. Luther, Prof. Dr. Schmidt und Prof. Dr. Wasserscheid.



Abbildung 8 – Impressionen von der Konferenz in Doha

Staffelstabübergabe

Zu Beginn der zweiten Förderperiode übergab Prof. Dr. Wolfgang Arlt den Vorsitz der Wissenschaftlichen Leitung an Prof. Dr. Veronika Grimm, die von der Wissenschaftlichen Leitung einstimmig gewählt wurde. Die „Staffelstabübergabe“ erfolgte im Rahmen eines Ministerialtermins mit den Staatssekretären Franz Josef Pschierer und Bernd Sibler in Kulmbach, sowie auf einer Festveranstaltung am EnCN.



Abbildung 9 – oben: Staffelstabübergabe mit den Staatssekretären Franz Josef Pschierer und Bernd Sibler in Kulmbach; unten: Impressionen der Festveranstaltung am EnCN

EnCN-Sommerfest



Abbildung 10 – Impressionen vom EnCN-Sommerfest

Über 80 Forscherinnen und Forscher – viele in der zweiten Förderperiode neu am EnCN – kamen zum EnCN-Sommerfest, das zugleich auch als Kick-Off für die zweite Förderperiode genutzt wurde. So stellten sich die einzelnen Forschungsbereiche und Projekte in kurzen Präsentationen und bei einer Posterausstellung vor. Auf dem anschließenden Sommerfest gab es reichlich Möglichkeit für die Forscher, sich untereinander besser kennenzulernen und zwischen den Projekten Kontakte zu knüpfen.

Lange Nacht der Wissenschaften

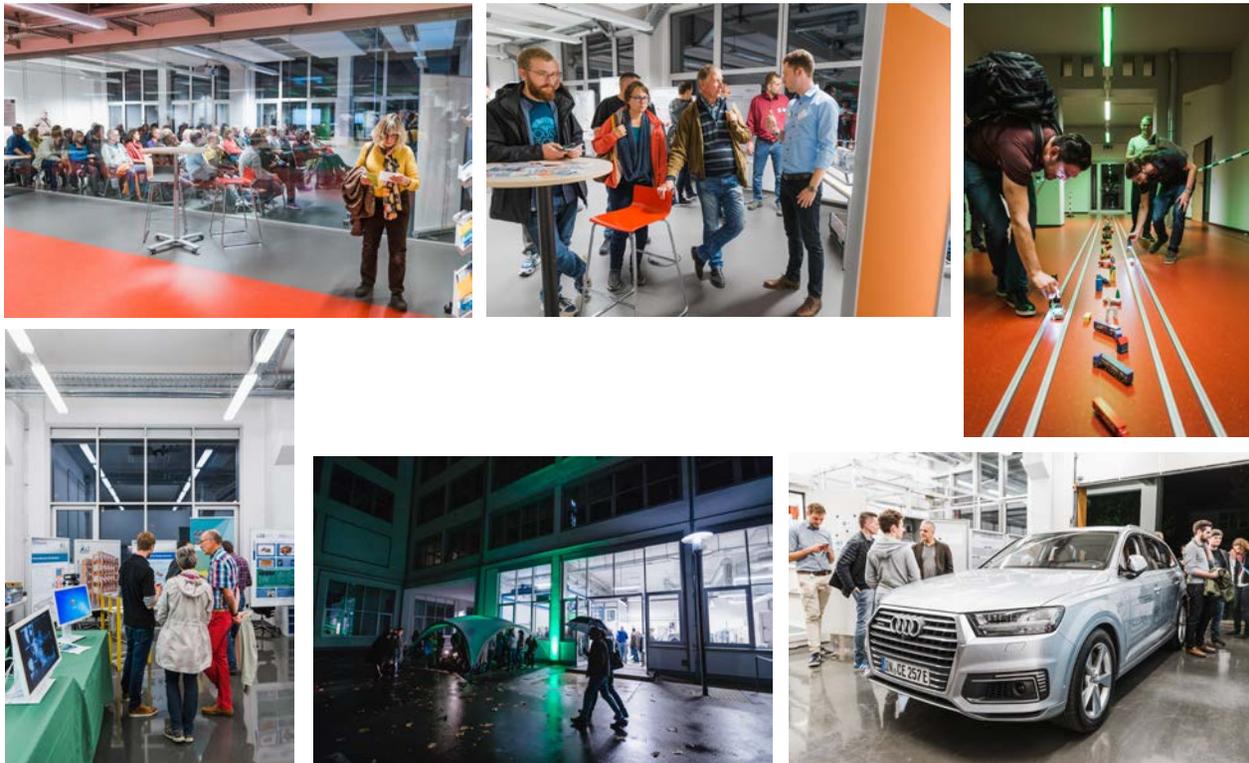


Abbildung 11 – Impressionen von der Langen Nacht der Wissenschaften

Auf der Langen Nacht der Wissenschaften am 21.10. präsentierte sich der EnCN mit insgesamt 16 Programmpartnern aus allen Forschungsbereichen. Wie in den Vorjahren übernahm der EnCN die Gesamtorganisation für alle Aussteller „Auf AEG“. Am EnCN gab es ein umfangreiches Vortragsprogramm sowie zahlreiche Vorführungen und Mitmachaktionen. Das Angebot wurde mit mehr als 2.000 Besuchern sehr gut angenommen.

Jahreskonferenz

Am 13.12. fand schließlich die EnCN-Jahreskonferenz statt. Anlässlich der erstmaligen Verleihung des EnCN-Energiepreises durch den Förderverein wurde die bislang stets interne Veranstaltung durch einen öffentlichen Teil ergänzt. Im internen Teil der Konferenz stellten 20 Forscherinnen und Forscher in vier parallelen Sessions die neuesten Ergebnisse der Forschung am EnCN vor. Als Gastreferent für den öffentlichen Teil konnte Prof. Dr. Achim Wambach, Präsident des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung und Vorsitzender der Monopolkommission, gewonnen werden. Er stellte vor gut 100 Konferenzbesuchern unter dem Titel „Energie 2017: Gezielt vorgehen, Stückwerk vermeiden“ Auszüge aus dem aktuellen Sondergutachten der Monopolkommission vor. Nach der feierlichen Verleihung des Energiepreises gaben die Sprecher der Forschungsbereiche noch aktuelle Einblicke in die aktuelle Forschungsarbeit am EnCN. Im Anschluss an den Vortragsteil hatten die Besucher noch die Möglichkeit, einen Blick in die Labors und Technika am EnCN zu werfen.



Abbildung 12 – Impressionen der EnCN-Jahreskonferenz

EnCN Energiepreis

Der mit insgesamt 3.000 € dotierte EnCN Energiepreis wurde dieses Jahr auf der Jahreskonferenz erstmals vergeben. Die Vorstände des EnCN e.V. Christian Zens und Dr. Michael Fraas zeichneten insgesamt 5 Abschlussarbeiten aus verschiedenen Forschungsbereiche des EnCN mit je 600 € aus. Der vom EnCN e.V. ausgelobte Preis prämiiert herausragende Abschlussarbeiten, 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.

Tabelle 2 – Preisträger des EnCN-Energiepreis 2017

Name	Forschungsbereich	Titel der Arbeit
Tanja Schneider	Speicher	Allotherme Wasserdampfvergasung von Biomasse
Vanessa Krebs	Energiemarktdesign	On the uniqueness of competitive market equilibria on DC networks
Lars Nolting	Effizienz	Analyse der Einflussfaktoren auf die Effizienz von Wärmepumpen und Brennwertkesseln im Hinblick auf die europäischen Ökodesign- und Labellingrichtlinien
Bastian Preller	Energiemanagementtechnologien	Regelung und Zustandsschätzung eines Modulare Multilevel Umrichters
Stefan Schmitt	Netze	Entwurf und Implementierung einer Modellbasierten Prädiktiven Regelung für den Modulare Multilevel-Umrichter



Abbildung 13 - Preisträger des EnCN-Energiepreis: v.l.n.r. Dr. Alexander Buchele (Geschäftsführer EnCN), Gastreferent Prof. Achim Wambach, (Präsident des ZEW und Vorsitzender der Monopolkommission), Christian Zens (Vorstandsvorsitzender des EnCN e.V. und Kanzler der FAU), Lars Nolting (Fraunhofer IBP / RWTH Aachen), Stefan Schmitt (FAU), Tanja Schneider (FAU), Vanessa Krebs (FAU), Bastian Preller (THN), Prof. Veronika Grimm (Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung des EnCN), Dr. Michael Fraas, (Vorstand des EnCN e.V. und Wirtschaftsreferent der Stadt Nürnberg)

Wissenschaftliche Aktivitäten

Kick-Off 2. Förderperiode

Alle Forschungsbereiche und geförderten Projekte sind mit einem Kick Off in die zweite Förderperiode gestartet. Dabei wurden sowohl organisatorische Fragen geklärt als auch erste Weichen gestellt für die zielgerichtete Bearbeitung der Projekte. Vor allem die zahlreichen neuen wissenschaftlichen Mitarbeiter hatten hier auch eine gute Gelegenheit, ihre Kollegen kennenzulernen und sich zu vernetzen.



Gruppenbild Erneuerbare Energien



Gruppenbild Energiemarktdesign



Gruppenbild Effizienz (Effiziente Gebäudehülle)



Gruppenbild Energiemanagementtechnologien



Gruppenbild Speicher



Gruppenbild Effizienz (Effiziente Antriebstechnik)



Gruppenbild Netze

Im Rahmen des Starts in die zweite Förderperiode wurde auch ein Informationsaustausch für die Verwaltungsmitarbeiter, insbesondere der Lehrstuhlsekretärinnen durchgeführt, um die Rahmenbedingungen der EnCN2-Projekte zu erläutern.

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 3 – Wissenschaftliche Beiträge in den EWL-Sitzungen

Datum	Forschungsbereich	Vortragstitel	Referent
15.05.17	Speicher	Wasserstoff-Methan BHKW im Speicher B Projekt	Prof. Dr. Stefan Will
26.06.17	Energiemarktdesign	Energiemarktmodellierung im EnCN	Prof. Dr. Veronika Grimm
24.07.17	Effizienz	Vorstellung des Teilprojekts Effiziente Antriebstechnik	Prof. Dr. Armin Dietz Prof. Dr. Andreas Kremser
16.10.17	Speicher	Hochdruckkompressor mit Kompressionswärmeabgabe zur Dehydrierung von LOHC als Bestandteil für eine energieeffiziente Wasserstofftankstelle	Prof. Dr. Eberhard Schlücker
11.12.17	Energiemanagementtechnologien	Leistungselektronik im EnCN	Prof. Dr. Martin März

Politikberatung

Mitglieder des EnCN haben 2017 zwei von der Politik beauftragte Studien erstellt. Dies macht deutlich, dass auch in der Politik die im EnCN vorhandene Expertise zu Energiethemen geschätzt wird. Beide Studien sind öffentlich und können über die Geschäftsstelle bezogen werden.



Studie für die Monopolkommission „Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung“

Diese Studie befasst sich mit den langfristigen Auswirkungen verschiedener Marktdesigns auf Investitions- und Produktionsanreize im Strommarkt. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf der räumlichen Ansiedlung der Erneuerbaren Energien (EE). In verschiedenen Szenarien werden die Auswirkungen der EE-Standorte auf das Stromversorgungssystem untersucht und die Fördermechanismen charakterisiert, die entsprechende Standorte induzieren können. Die in dieser Studie betrachteten Szenarien variieren (1) die Ansiedlung (räumliche Verteilung) der EE, (2) die Einbeziehung der EE in das Engpassmanagement und (3) die Antizipation kurzfristiger Maßnahmen des Engpassmanagements bei der Netzausbauplanung.

Autoren Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Gregor Zöttl und Christian Sölch



Machbarkeitsstudie für Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur „Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr“

Diese Machbarkeitsstudie zeigt Wege auf, wie der Schwerlastverkehr CO₂-frei gestaltet werden kann. Die Energiequelle ist dabei Wasserstoff, nicht jedoch als Gas, sondern in energiedichter, chemisch gebundener, bei Umgebungsbedingungen flüssiger Form (LOHC), so dass Änderungen an der Infrastruktur der Tankstellen marginal sein werden. LOHC kann man dann tanken wie Diesel.

Autoren Prof. Dr. Wolfgang Arlt, Prof. Dr. Michael Wensing, Prof. Dr. Peter Wasserscheid, und weitere

Bayerischen Wissenschaftsforum (BayWISS)

Durch die Gründung des Bayerischen Wissenschaftsforum (BayWISS) plant das Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst (StMBW) mit den Mitgliedern der Hochschulverbände „Verbundkollegs“ einzurichten, um Kooperationen zwischen den HAWs und den Universitäten zu fördern und insbesondere die Promotionen der wiss. MitarbeiterInnen an HAWs zu unterstützen. Hier kooperieren die FAU, die THN und die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH) und haben eine entsprechende Kooperationsvereinbarung geschlossen, ein Verbundkolleg Energie einzurichten. Die thematische Ausrichtung der Forschungsbereiche passt sehr gut zu denen des EnCN:

- Chemische und thermische Speichertechnologien
- Gebäude- und Produktionseffizienz
- Thermische Energieanlagen und Energiewandlung
- Netze und Infrastruktur
- Elektrische Energie- und Antriebstechnik
- die Kraft-Wärme-Kopplung
- die Energieverfahrenstechnik
- die energetische Nutzung von Biomasse

Ein erstes Netzwerktreffen zur Identifikation möglicher Themen und Projekte hat bereits am 30.11.-01.12. stattgefunden. Hier haben auch zahlreiche EnCN-Forscher (Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Dietz, Dr. Egerer, Prof. Dr. Karl, Prof. Dr. Krcmar, Prof. Dr. Kremser, Prof. Dr. Pruckner, Prof. Dr. Wensing) ihre Projektideen vorgestellt.

Das Verbundkolleg unterhält eine Geschäftsstelle mit der Ansprechpartnerin Dr. Astrid Schweizer, die in den Räumen des EnCN angesiedelt ist.

Storage With Amply Redundant Megawatt (SWARM)

In Kooperation mit der N-ERGIE AG und Caterna GmbH wurde im Projekt SWARM ein virtueller elektrischer Großspeicher installiert. Im Projekt waren die Forschungsbereiche Netze und Energiemarktdesign eingebunden. Die Wissenschaftler entwickelten das Simulationsmodell eines Kleinspeicher-Verbunds, das die technischen Auswirkungen der Speicher auf die Netze ermittelt bzw. den ökonomischen Nutzen für die beteiligten Privathaushalte und für das gesamte Energiesystem identifiziert. Im Bereich der Konsumforschung wurden im Projekt SWARM wiederholte Kundenbefragungen durchgeführt, um mittels verhaltensökonomischer und experimenteller Methoden die Akzeptanz und das Nutzungsverhalten bei koordinierten Kleinspeichern zu analysieren. Die Attraktivität der Speichertechnologie konnte dabei im Zeitverlauf untersucht werden. Es wurden verschiedene Kundensegmente identifiziert und auf ihre Investitionsneigung, Einstellung zum Produkt und ihr Informationsverhalten hin untersucht.

Energiespeicherhäuser HerzoBase

Im Rahmen eines Modellprojektes wird einen Reihenhauskomplex mit 8 Wohneinheiten gebaut. Zum Einsatz kommen neuartige höchstwärmedämmende Massivwandbau-stoffe mit integrierter Wärmedämmung und neue Konzepte zur Steuerung von geothermischen Wärmepumpen mit elektrischen und thermischen Speichern in Kombination mit PV-Anlagen.

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

Datum, Ort	Veranstaltung	Organisator
02.02., EnCN	CMTS-Podiumsdiskussion: Fünf Jahre nach Fukushima – Energiewende Quo Vadis: Dezentrale Antworten für eine globale Herausforderung?	Energiemarktdesign Prof. Dr. Grimm, Prof. Dr. Zöttl, sowie weitere Forscher der FAU
16.-17.02., EnCN	3. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop	Energiemarktdesign Prof. Dr. Grimm, Prof. Dr. Zöttl, sowie weitere Forscher der FAU
09.-10.03., EnCN	Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss des Bundes Deutscher Gießereiunternehmen (BDG)	Effizienz Prof. Dr. Schlüter
04.04., EnCN	Workshop mit N-Ergie	Energiemarktdesign Prof. Dr. Grimm
27.-28.04., EnCN	Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES)	Energiemarktdesign Prof. Dr. Grimm, Dr. Egerer
26.-28.06., EnCN	IEEE Power and Energy Student Summit 2017	Netze Prof. Dr. Luther, Dr. Mehlmann
27.-29.06., Nürnberg	IEEE International Conference on DC Microgrids	Energiemanagementtechnologien Prof. Dr. März
17.-18.07., EnCN	Smart City Energy Jam	Geschäftsstelle Dr. Buchele, sowie die Wirtschaftsförderung der Stadt Nürnberg
15.09., EnCN	Abschlusskolloquium "Wasserstoffversorgung in der Mobilität"	Speicher Prof. Dr. Arlt, Prof. Dr. Wasserscheid
27.09., EnCN	13. Arbeitssitzung des „Innovationsring Hintermauerziegelindustrie“	Effizienz Prof. Dr. Krcmar
13.12., EnCN	Jahreskonferenz	Wissenschaftliche Leitung und Geschäftsstelle

Besucher am EnCN

27.03.	Delegation aus Shenzhen
02.05.	Delegation aus den Niederlanden
12.05.	Delegation aus Lateinamerika
31.05.	Delegation aus Kolumbien
31.05.	Deutscher Städtetag
13.06.	Delegation aus Korea (LG Chemical)
21.08.	RC Nürnberg Kaiserburg
12.09.	Delegation aus Korea
19.10.	Delegation aus Glasgow (Handelskammer)
26.10.	Delegation aus China (Planungsministerium)
06.11.	Delegation aus Westkap/Südafrika
08.11.	Delegation aus China
09.11.	Delegation aus Quebec
30.11.	Delegation aus Durham/Kanada

Ausblick 2018

Internetauftritt

In der zweiten Förderperiode verändert sich sowohl die Themen- als auch die Projektstruktur. Um dem auch in der Außendarstellung Rechnung zu tragen wird die Internetpräsenz des EnCN grundlegend überarbeitet. Dabei wird ein „Bottom Up“-Ansatz gewählt, bei dem die verschiedenen Forschungsbereiche eigene Redakteure haben. So wird die Durchgängigkeit von Informationen und aktuellen Meldungen verbessert. Ein weiteres Ziel der Überarbeitung ist es, Inhalte für die Zielgruppen leichter und schneller verfügbar zu machen.

Energie Inkubator Bayern (EIB)

Das Energie-Technologische Zentrum 2.0 (etz) soll weiterentwickelt werden zum Energie Inkubator Bayern (EIB), der möglichst in Nachbarschaft zum EnCN angesiedelt werden soll. Aktuell läuft die Beantragung dieser Initiative. Aufgrund der engen thematischen und technologischen Verknüpfungen des EIB mit dem EnCN unterstützt die Wissenschaftliche Leitung die Beantragung. Die Vision des Inkubators ist es, der „Hot Spot“ für energietechnologische Gründer in Bayern zu werden. Ziel ist es, entlang der Energie-Wertschöpfungskette Theorie und Praxis zu verbinden, um daraus High-Tech Unternehmen entstehen zu lassen und zu fördern. Neben Büro- und Laborflächen soll der Inkubator insbesondere ein Netzwerk aus Wissenschaft und Unternehmen bereitstellen, das Gründern ein ideales Umfeld bietet.

Integration of Sustainable Energy Expo & Conference (iSEnEC)

Die 2016 erfolgreiche Konferenz iSEnEC wird 2018 wiederholt. Unter Federführung der Messe Nürnberg und mit zahlreichen weiteren Partnern organisiert der EnCN die umfangreiche Konferenz, die in ihrer Themenvielfalt auch die Forschungsbereiche des EnCN selbst widerspiegelt. Die Veranstaltung findet am 17./18.07.18 im NCC West der Messe statt.

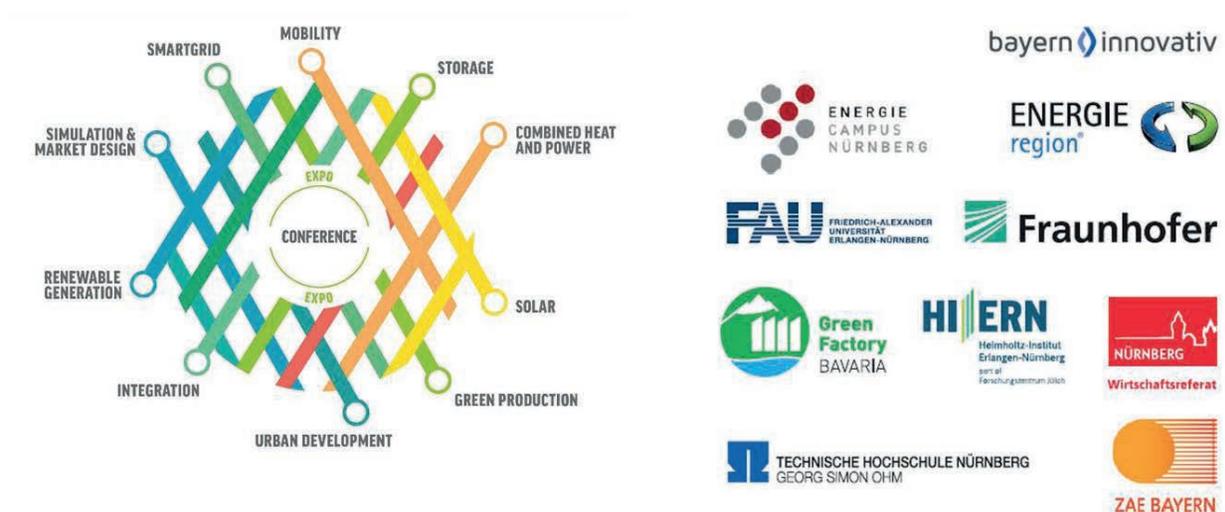


Abbildung 14 – Themenfelder und Partner der iSEnEC

Geschäftsstelle

Projektbericht 2017

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. Sie ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt die Vorsitzende der Wissenschaftlichen Leitung bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Auch wird sie in 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 Start der Zweiten Förderperiode

Mit dem Start in die zweite Förderperiode ergaben sich für die Geschäftsstelle einige – vor allem organisatorische – Aufgaben. Dazu gehörten vor allem folgende Tätigkeiten:

- Koordination aller notwendigen Umzüge im und in die EnCN Gebäude
- Koordination des Umbaus für das Speicherhaus
- Kick-Off für Verwaltungskräfte und Begleitung der Projekt Kick-Off Veranstaltungen
- Organisation des Gesamt Kick-Off

Insgesamt ist die zweite Förderperiode gut angelaufen. Es gab wenig Reibungsverluste und die Projekte konnten im Zeitplan gestartet werden.

Umzüge

In fast allen Forschungsbereichen und Projekten wurden für die zweite Förderperiode Umzüge notwendig. Diese mussten insgesamt koordiniert werden, um eine möglichst störungs- und unterbrechungsfreie Arbeit der einzelnen Arbeitsgruppen zu ermöglichen. Die Geschäftsstelle übernahm die Koordination der einzelnen Umzüge, Sicherstellung der Datenanbindungen und Schlüsselübergaben. Sämtliche Umzüge waren bis März erfolgreich abgeschlossen.

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. Derzeit werden die Ausbaumaßnahmen durch den Vermieter geplant, die Fertigstellung des Ausbaus ist für 2018 vorgesehen.

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

Einzel Kick-Off Veranstaltungen

Die Geschäftsstelle hat am 30.03. eine Informationsveranstaltung für alle Verwaltungskräfte angeboten, die mit den EnCN-Projekten befasst sind. Neben der Möglichkeit des gegenseitigen Kennenlernens stand vor allem die Vorstellung der Finanzstruktur sowie der Abrechnungsmodalitäten im Vordergrund.

Gesamt Kick-Off

Am 13.07. fand ein Gesamt Kick-Off für die zweite Förderperiode in Form einer Konferenz mit Sommerfest statt. Hier hatten alle Beteiligten des EnCN die Möglichkeit, die Kollegen und Projekte aus den anderen Forschungsbereichen kennenzulernen. Die Gesamtorganisation für diese Veranstaltung wurde von der Geschäftsstelle übernommen.



Abbildung 1: Bilder Kick-off Meeting mit Sommerfest

1.2 EnCN-Energiepreis

In Zusammenarbeit mit dem EnCN verlieh der EnCN e.V. 2017 erstmals den Energiepreis. Der Preis ist mit insgesamt 3.000 € dotiert und wird für exzellente Abschlussarbeiten aus dem Umfeld des EnCN vergeben. Insgesamt wurden 5 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 2018 läuft bereits.



Abbildung 2: Einladungskarte zur Ausschreibung des Energiepreises

1.3 Außendarstellung

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit war der EnCN 2017 auf einigen Veranstaltungen aktiv.

- Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft in Berlin: Messestand, Konferenz- und Referentenbeteiligung
- Hannover Messe: Messestand
- Lange Nacht der Wissenschaften: Teilnahme mit zahlreichen Ausstellungen, Mitmachaktionen und Vortragsprogramm
- Offen Auf AEG: Teilnahme mit Ausstellung und Mitmachaktionen



Abbildung 3: Bilder Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft und Lange Nacht der Wissenschaften

Die 2016 gestartete Videoserie wurde 2017 fortgesetzt. Es wurden Videos zu den Themen Gebäude, Netze und Digitalisierung konzipiert. Derzeit laufen noch die letzten Dreharbeiten, die Videos werden ab Frühjahr 2018 verfügbar sein.

Die Geschäftsstelle hat 2017 einige Workshops mit Unternehmen organisiert, um die EnCN-Forscher zielgerichtet mit potentiellen Projektpartnern in Kontakt zu bringen.

Datum, Ort	Unternehmen	Beteiligte EnCN-Forscher, Forschungsbereich
19.05.17, EnCN	Envi Con & Plant Engineering GmbH	Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Speicher Prof. Dr. Jürgen Karl, Speicher
07.09.17, EnCN	Power and Air Condition Solution Management GmbH	Prof. Dr. Veronika Grimm, Energiemarktdesign Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Speicher Prof. Dr. Martin März, Energiemanagementtechnologien Karlheinz Ronge, Energiemanagementtechnologien
15.05.17, EnCN 04.10.17, Mannheim	MVV Energie AG	Prof. Dr. Alexander Martin, Energiemarktdesign Karlheinz Ronge, Energiemanagementtechnologien

1.4 Organisation

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



Abbildung 4: Mitarbeiter der Geschäftsstelle Energie Campus Nürnberg

2 Schlussworte

Der EnCN ist gut in die zweite Förderperiode gestartet. Alle Forschungsbereiche und Projekte können nach dem ersten Jahr schon erste Ergebnisse präsentieren. Die Vernetzung innerhalb und zwischen den Projekten und Themen ist vor allem mit der Einrichtung der Erweiterten Wissenschaftlichen Leitung sowie dem Sommerfest und der Jahreskonferenz gut gelungen.

Nun wird es vor allem darauf ankommen, in den nächsten Jahren eine gemeinsame tragfähige und nachhaltige Perspektive zu entwickeln, die den EnCN auch über das Jahr 2021 hinausträgt.

3 Veranstaltungen und Presse

3.1 Veranstaltungen am EnCN

Datum	Veranstaltung	Titel
23.01.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
02.02.17	Podiumsdiskussion	CMTS-Podiumsdiskussion: Fünf Jahre nach Fukushima – Energiewende Quo Vadis: Dezentrale Antworten für eine globale Herausforderung?
14.02.17	Sitzung	Lenkungsausschuss
16.02.17	Workshop	PM-Lounge
16.-17.02.17	Workshop	3. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop
28.02.17	Vortrag	Kinderuni FAU
06.03.17	Sitzung	Runder Tisch Zukunftsfähige Immobilie
09.-10.03.17	Sitzung	Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss des Bundes Deutscher Gießereiunternehmen (BDG)
14.03.17	Sitzung	Green.economy
15.03.17	Sitzung	Runder Tisch Kraft-Wärme-Kopplung
16.03.17	Sitzung	Fachbeirat
21.03.17	Seminar	Moderne Heizungssysteme und Heizungsumrüstung im Mehrfamilienhaus
27.03.17	Besuch	Delegation aus Shenzhen/China
04.04.17	Workshop	N-ERGIE
06.04.17	Sitzung	Netzwerktreffen Printed Electronics
10.04.17	Vortrag	Kinderuni FAU
11.04.17	Vortrag	Kinderuni FAU
20.04.17	Vortrag	Kinderuni FAU
27.-28.04.17	Seminar	Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES)
02.05.17	Besuch	Delegation Niederlande
08.05.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
09.05.17	Workshop	Energieeffizientes Krankenhaus
12.05.17	Besuch	Delegation Lateinamerika
16.05.17	Sitzung	Vorstand EnergieRegion Nürnberg e.V.
18.05.17	Workshop	10.000-Häuser Programm

Datum	Veranstaltung	Titel
19.05.17	Workshop	Jenseits des Wasser-Dampf-Kreislauf
22.05.17	Workshop	Nachhaltige Energiesysteme
29.05.- 02.06.17	Vorlesung	Internationale Energiewirtschaft und Unternehmensführung
31.05.17	Besuch	Delegation aus Kolumbien
31.05.17	Besuch	Deutscher Städtetag
05.06.17	Vortrag	Kinderuni FAU
06.06.17	Vortrag	Kinderuni FAU
08.06.17	Vortrag	Kinderuni FAU
13.06.17	Besuch	Delegation aus Korea (LG Chemical)
19.06.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
20.06.17	Sitzung	Green.economy
27.-29.06.17	Konferenz	IEEE Power and Energy Student Summit 2017
29.06.17	Podiumsdiskussion	60 Jahre EU
30.06.17	Veranstaltung	Staffelstabübergabe Wissenschaftliche Leitung
05.07.17	Sitzung	IHK-Ausschüsse Energie Umwelt & Industrie Forschung Technologie
10.07.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
11.07.17	Workshop	Isolationskoordination
12.07.17	Vortrag	Energie & Architektur
13.07.17	Konferenz	EnCN-Sommerkonferenz & Sommerfest
17.-18.07.17	Workshop	Smart City Energy Jam
20.07.17	Seminar	Elektromobilität trifft Energiewirtschaft
22.07.17	Workshop	TRR 154
25.-26.07.17	Seminar	Induktivitäten in der Leistungselektronik
21.08.17	Besuch	RC Nürnberg Kaiserburg
07.09.17	Workshop	PASM
12.09.17	Besuch	Delegation aus Korea
14.09.17	Seminar	Mieterstromförderung
15.09.18	Seminar	Abschlusskolloquium „Wasserstoffversorgung in der Mobilität“
21.09.17	Sitzung	Spitzengespräch Energieeffizient in der Wohnungswirtschaft
26.09.17	Sitzung	Vorstand ZAE Bayern
27.09.17	Sitzung	13. Arbeitssitzung des „Innovationsring Hintermauerziegelindustrie“
29.09.17	Seminar	Energieberatung im Unternehmen
05.-06.10.17	Workshop	Fortschritt durch Technik
18.10.17	Seminar	Informationsveranstaltung BayFor
21.10.17	Veranstaltung	Lange Nacht der Wissenschaften
26.10.17	Sitzung	Vorstand EnCN e.V.
26.10.17	Sitzung	Lenkungsausschuss
26.10.17	Workshop	StartUP-Pitch
02.11.17	Seminar	CMTS-Seminar

Datum	Veranstaltung	Titel
06.11.17	Besuch	Delegation aus Westkap/Südafrika
08.11.17	Besuch	Delegation aus China
08.11.17	Seminar	Dämmen und Lüften im Mehrfamilienhaus
09.11.17	Besuch	Delegation aus Quebec/Kanada
10.11.17	Sitzung	Zukunftsrat der Bayerischen Wirtschaft
13.11.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
14.11.17	Seminar	Erstellung von Lüftungskonzepten
28.11.17	Seminar	Elektromobilität
30.11.17	Seminar	Wärmeeffizienz in der Produktion
30.11.17	Besuch	Delegation aus Durham/Kanada
30.11.17	Seminar	Kalte Nahwärmenetze
04.12.17	Vortrag	Wissenschaft Auf AEG
05.12.17	Seminar	Ansteuer- und Schutzschaltungen für MOSFET und IGBT
07.12.17	Seminar	CMTS-Seminar
13.12.17	Konferenz	Jahreskonferenz mit Verleihung des EnCN-Energiepreis

3.2 Presseberichterstattung

Der Energie Campus Nürnberg und seine Protagonisten, Forschungsthemen und Veranstaltungen war 2017 mehrfach Gegenstand der – zumeist lokalen – Berichterstattung in der Presse.

Datum	Medium	Titel
05.01.17	Mittelbayerische Zeitung	Nach Aus für Uni-Pläne herrscht Zwist
19.05.17	Wirtschaftszeitung	Energieeffizienz stärkt Wettbewerbsfähigkeit
11.07.17	Nürnberger Nachrichten	Energiewende wird weiter vorangetrieben
14.07.17	Nürnberger Nachrichten	Dokortitel für Energiethema
27.07.17	Nürnberger Nachrichten	Fürth: Liebe zur Meile Stadtspitze hätte die TechFak gerne "Auf AEG" gesehen
07.08.17	Straubinger Tagblatt	Thema "Mieterstrom": CARMEN-Fachgespräch in Nürnberg
08.08.17	Nürnberger Zeitung	Freistaat fördert weiter Geld für Energie Campus
18.09.17	Fränkischer Tag	Energiezentrale für acht Häuser
07.10.17	Nürnberger Nachrichten	Frau Professor: Der Weg dahin ist lang und steinig
18.10.17	Nürnberger Nachrichten	Wissenschaft wird eine Nacht lang zum Erlebnis
06.11.17	Fränkischer Tag	Energie Wasserstoff / im Tank
07.11.17	Nürnberger Nachrichten	Uni strahlt großes Selbstbewusstsein aus
08.11.17	Nürnberger Zeitung	In wenigen Worten
28.11.17	Süddeutsche Zeitung	Volle Kraft voraus
16.12.17	Nürnberger Nachrichten	Die nächste Generation der Energieforscher im Rampenlicht

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

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Hochschule Ansbach; Fakultät Ingenieurwesen</p> <p>THN - Fakultät Maschinenbau / Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)</p> <p>THN - Fakultät Maschinenbau / Versorgungstechnik</p> <p>THN - Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik</p> <p>THN - Fakultät Informatik</p> <p>THN - Fakultät Werkstofftechnik</p>	<p>TPJ1: Energieeffiziente Gebäudehülle; Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Gallwitz, Prof. Dr. Grün, Prof. Dr. Kießling, Prof. Dr. Krcmar</p> <p>TPJ2: Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen; Prof. Dr. Kremser</p> <p>TPJ3: Energieeffiziente Ansteuerkonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme; Prof. Dr. Dietz</p> <p>TPJ4: User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben; Prof. Dr. Schlüter</p>

Projektbericht 2017

Ein verantwortungsvoller und sorgsamer 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“ besteht das Ziel darin, Bau- und Dämmstoffe der Gebäudehülle durch bisher nicht genutzte Effekte energieeffizienter auszurüsten. Außerdem erfolgt die konstruktive Entwicklung und bauphysikalische Bewertung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden unter Berücksichtigung neuer Stromversorgungskonzepte und Bilanzierungs-methoden. 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.

Beim 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 Energieeffiziente Gebäudehülle

1.1 Entwicklung und Ausrüstung neuer, höchstwärmedämmender Baustoffe mit verminderter Wärmeleitfähigkeit; Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät

Werkstofftechnik, Prof. Dr. W. Krcmar, M.Sc. E. Kränzlein, M.Sc. N. Wedel, M.Eng. C. Allar, M.Eng. N. Hesse, M.Eng. S. Schmidt, M.Eng. D. Sappa und M.Eng. T. Grotz

Einführung 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 werden, zeichnen sich durch einen geringeren Energiebedarf 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 Batteriespeichers verkleinert.

1.1.1 Verbesserung der Wärmedämmung von Dünnbettmörtel; Prof. Dr. W. Krcmar, M.Eng. Sebastian Schmidt und M.Eng. Daniela Sappa

Das Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeiten bestand in der Entwicklung eines neuartigen Dünnbettmörtels, der sich durch eine verminderte Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit auszeichnet. Für die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte eine anteilige Substitution von Dünnbettmörtel-Bestandteilen mit einer Korngröße $\geq 125 \mu\text{m}$ durch ausgewählte Zusatzstoffe, u.a. expandiertes Alumosilikat, Glashohlkugeln, Bimsmehl, expandierter Perlit, pyrogene Kieselsäure, Vermiculit und Schmelzkammer-Granulat. Nach einer Aushärtungszeit der Proben von jeweils 7 bzw. 28 Tagen erfolgte die experimentelle Bestimmung wichtiger werkstofftechnischer Kenngrößen. Abb. 1 zeigt die Korrelation der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ mit der Druckfestigkeit der drei besten Dünnbettmörtel-Zuschlagstoff-Mischungen.

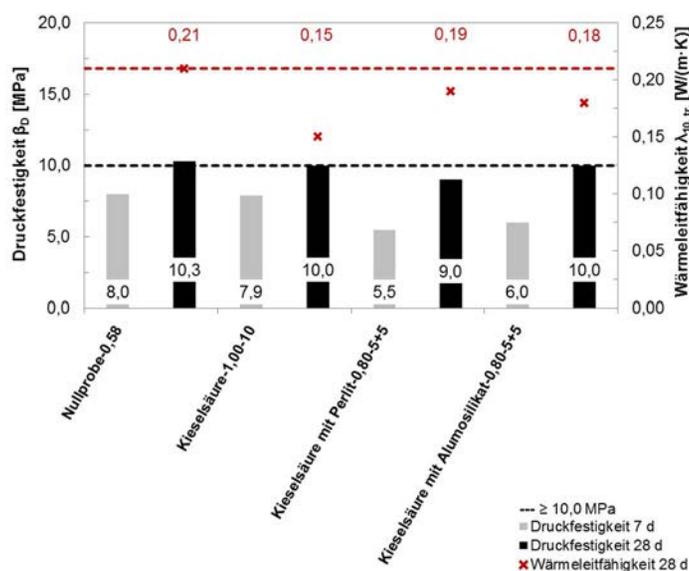


Abb. 1: Korrelation der 7 Tage- und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr}}$ modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit vom Wasser-/Mörtel-Verhältnis mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat im Vergleich zur Nullprobe.

Die gezielte Substitution von Mörtel-Grobanteilen durch 10 Vol.-% pyrogene Kieselsäure bewirkt eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,21$ auf $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 28,6 %. Diese Absenkung kann mit einer Porenzunahme um 626 % im Bereich der Mesoporen zwischen 2 bis 50 nm erklärt werden. Gleichzeitig lagen die gemessenen Druckfestigkeiten der modifizierten Proben in der gewünschten Druckfestigkeitsklasse M 10. Dieser Effekt ist ungewöhnlich und lässt sich

auf die puzzolanische Reaktivität der pyrogenen Kieselsäure mit Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) unter zusätzlicher Bildung druckfestigkeitssteigernder CSH-Phasen zurückführen (Abb. 2).



Mittels Röntgenanalysen (XRD) wurde qualitativ nachgewiesen, dass die Portlandit-Intensitäten bei Zugabe von 10 Vol.-% pyrogenen Kieselsäure über den gesamten Hydratationszeitraum niedriger liegen, als bei der Nullprobe ohne Zugabe von pyrogenen Kieselsäure. Mit Hilfe thermogravimetrischer Untersuchungen wurde ein Portlandit-Gehalt in der Dünnbettmörtel-Nullprobe von 10,28 Ma.-% ermittelt. Die Dosierung von 10 Vol.-% pyrogenen Kieselsäure führt zu einer puzzolanischen Reaktion mit Portlandit-Abbau auf 8,02 Ma.-%, entsprechend um 22 %. Die angefertigten REM-Aufnahmen bestätigen die Ergebnisse aus den XRD- und TG-Analysen.

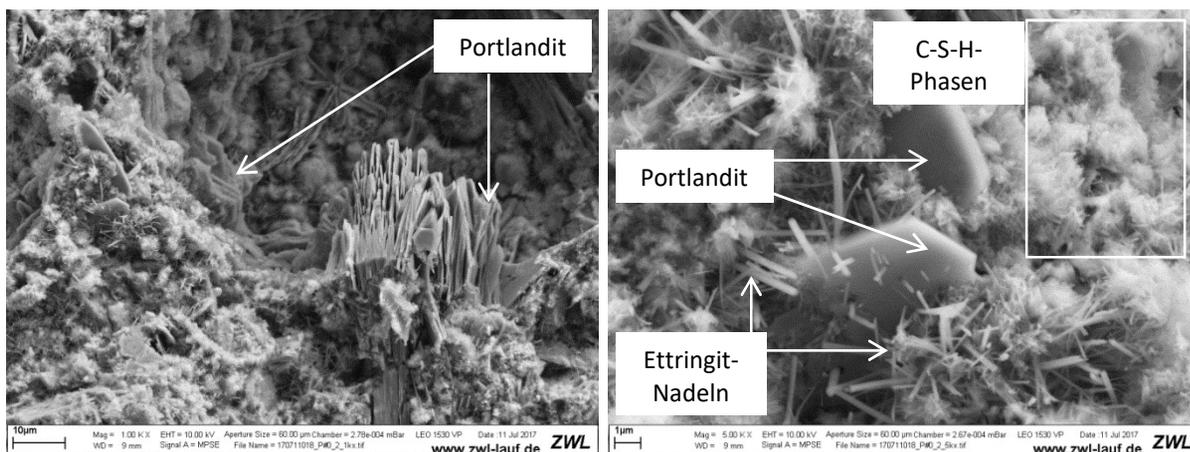


Abb. 2: REM-Aufnahmen der Bruchoberfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von 28 Tagen an Luft.

Bei anteiliger Substitution der Grobanteile $\geq 125 \mu\text{m}$ durch eine Zusatzstoff-Kombination aus jeweils 5 Vol.-% pyrogenen Kieselsäure und expandiertem Perlit resultiert eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf $0,19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 9,5 %. Auch hier lässt sich die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit durch Zunahme des Mesoporen-Volumens um 204 % erklären. Die Druckfestigkeit lag allerdings nicht in der gewünschten Druckfestigkeitsklasse M 10.

Die Zusatzstoff-Kombination aus jeweils 5 Vol.-% pyrogenen Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat führt ebenfalls zu einer wärmetechnischen Optimierung des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf $0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 14,3 %. Der Effekt ist auf eine Erhöhung des Mesoporen-Volumens um 291 % zurückzuführen. Der so modifizierte Dünnbettmörtel erfüllt ebenfalls die Druckfestigkeitsklasse M 10.

Aus der Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Makroporen-Volumina im Bereich zwischen 100 bis 1000 nm, ergibt sich der eindeutige Zusammenhang: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher wird die Wärmeleitfähigkeit abgesenkt. Monolithisch aufgebaute Wände, die mit einem entsprechend modifizierten Dünnbettmörtel aufgemauert werden, müssten sich durch eine verbesserte Wärmedämmung auszeichnen.

Aus einer durchgeführten Finite-Elemente Berechnung einer Ziegelwand mit Mörtelfuge geht hervor, dass bei der Anwendung des neuentwickelten Dünnbettmörtels in einer Schichtstärke von 3 mm, eine Verbesserung der Wärmedämmung um maximal 2 % zu erwarten ist. Wird der Effekt auf eine Ziegelwand mit einer Dickbettmörtel-Fuge der Höhe 12 mm übertragen, so ist eine vergleichsweise Verbesserung der Wärmedämmung um max. 5 % möglich.

1.1.2 Verbesserung der Wärmedämmung von Putzmörtel; Prof. Dr. W. Krcmar, M. Eng. Sebastian Schmidt und M.Eng. Tim Grotz

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten bestand in der Erforschung & Entwicklung eines neuartigen Putzmörtels (Sockelputz), der sich durch eine gegenüber dem Stand der Technik verbesserte Wärmedämm-Eigenschaft bei

gleichbleibender Druckfestigkeit auszeichnet. Um das Ziel zu erreichen, wurde untersucht, ob der bereits aus der Dünnbettmörtel-Optimierung bekannte Effekt der Mikroporosierung mit pyrogener Kieselsäure auf Putzmörtel übertragen werden kann. Als Ausgangsmaterial (Nullprobe) wurde ein verkaufsfertiger zementhaltiger Sockel- und Nassraumputz eines namhaften Herstellers für den Innen- und Außenbereich ausgewählt, der auch als Unter- und Fertigputz verwendet wird. Der Putz zeichnet sich durch eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einer Druckfestigkeit von $\beta_D \geq 6,0 \text{ MPa}$ aus und gehört der Mörtelgruppe P III an.

Der Putzmörtel wurde durch Siebung in die entsprechenden Fraktionen aufgetrennt und die grobe Siebfraction $\geq 125 \mu\text{m}$ anteilig durch 5 Vol.-% pyrogene Kieselsäure substituiert. Bei der Herstellung der Mischungsreihen mit pyrogener Kieselsäure war eine angepasste Variation der Wasser/Mörtel-Verhältnisse notwendig, wobei stets auf eine gute Verarbeitbarkeit des Putz-Frischmörtels geachtet wurde. Nach einer Abbindezeit der hergestellten Putzmörtel-Proben von 7 bzw. 28 Tagen erfolgte die Bestimmung der werkstofftechnischen Kenngrößen. Abb. 3 zeigt die Korrelation der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ mit der Druckfestigkeit bei angepassten Wasser/Mörtel-Verhältnissen.

Die Wärmeleitfähigkeit der Putzmörtel-Nullprobe wird von $\lambda_{10, tr.} = 0,45$ auf $0,32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 28,8 % abgesenkt. Die Absenkung ist mit einer Porenzunahme um 377 % im Bereich der Mesoporen zwischen 2 bis 50 nm erklärbar. Gleichzeitig erfolgt eine Anhebung der Druckfestigkeit von $\beta_D = 10,0$ auf $14,9 \text{ MPa}$ um 49 %. Aus der Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus den Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Makroporen-Volumina im Bereich zwischen 100 bis 1000 nm, ergibt sich der eindeutige Zusammenhang: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher wird die Wärmeleitfähigkeit abgesenkt. Dabei bleibt die Druckfestigkeit konstant bzw. erhöht sich sogar in diesem Fall. Durch Röntgen-Analysen (XRD) war es möglich, den druckfestigkeitssteigernden Effekt auf den „Portlandit-Abbau“ zurückzuführen. Hierbei kommt es zu einer puzzolanischen Reaktion zwischen dem Portlandit (Calciumhydroxid) und der pyrogenen Kieselsäure unter Ausbildung zusätzlicher, druckfestigkeitserhöhender CSH-Phasen. Mittels thermogravimetrischer Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei Vorhandensein von pyrogener Kieselsäure im Putzmörtel ein Portlandit-Abbau um 82 % erfolgt.

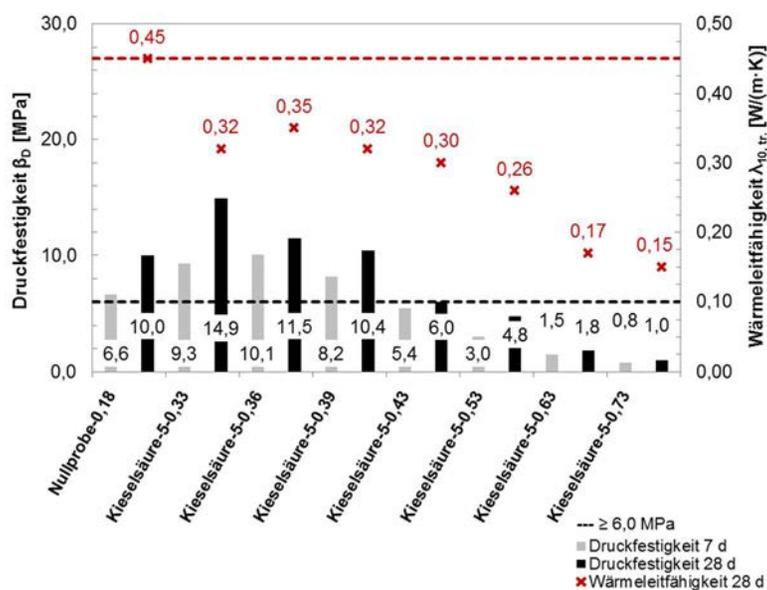


Abb. 3: Korrelation der 7 Tage- und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ modifizierter Putzmörtel-Proben mit 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in Abhängigkeit vom Wasser-/Mörtel-Verhältnis im Vergleich zur Nullprobe.

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, dass die Substitution von Grobanteilen $\geq 125 \mu\text{m}$ im Dünnbett- und im Putzmörtel durch pyrogene Kieselsäure, zu einer wärmetechnischen Optimierung dieser Wandbaustoffe führen. Dabei bleibt die Druckfestigkeit erhalten bzw. erhöht sich sogar.

Es kann angenommen werden, dass sich dieser Effekt auf alle portlandzement-haltigen Bindebaustoffe übertragen lässt, die im Verlauf der Zementhydratation Portlandit freisetzen. Gebäudewände, die mit einem entsprechend modifizierten Dünnbett- und Putzmörtel ausgerüstet werden, zeichnen sich durch eine verbesserte Wärmedämmung aus. Um den Effekt zu beweisen, ist der Aufbau zweier Wandprüfkörper aus hochwärmedämmenden Ziegeln geplant. Dabei wird im

ersten Fall ein klassischer Dünnbettmörtel mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sowie ein klassischer Außenputz mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eingesetzt. Im zweiten Fall wird der Wandprüfkörper mit dem neuentwickelten Dünnbettmörtel mit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sowie dem neuentwickelten Sockelputz mit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aufgebaut. Die messtechnisch ermittelten U-Werte werden miteinander verglichen.

Die Arbeiten wurden von einem Doktoranden und zwei Werkstudenten ausgeführt. Neben der Dissertation wurden die Ergebnisse in mehreren Vorträgen präsentiert. Im November 2017 erfolgte die Anmeldung eines deutschen Patents. Darüber hinaus wurden drei Publikationen verfasst, die Mitte des Jahres 2018 in der Fachzeitschrift Zement-Kalk-Gips (ZKG) / Bauverlag veröffentlicht werden.

1.1.3 „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“; Prof. Dr. W. Krcmar, M.Eng. Nelli Wedel und M.Eng. Christian Allar

Im Projekt „NanoFIM - Höchstwärmedämmende Nanofaserisoliationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude“ (Förderkennzeichen: 03SF0543B) erfolgt die Entwicklung und Anwendung neuartiger Dämmstoffe aus nanoskaligen Faserstoffen. Diese werden von einem Projektpartner an der Freien Universität Berlin durch Elektrospinning hergestellt. Dazu werden Alt-Styropormengen aus dem Baustoff-Recycling verflüssigt und zu Nanofasern und Nanofaser-Vliesen versponnen. 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 wurden die Massivwandbaustoffe Ziegel und Kalksandstein, Dünnbettmörtel, Wärmedämmputz, Porenbeton sowie ein Geopolymer wärmetechnisch optimiert. Abb. 4 zeigt eine keramische Ziegelplatte mit einer Wärmeleitzahl von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,37 \text{ W}/(\text{mK})$. Die Platte wurde senkrecht zur Wärmestromrichtung durchgesägt und nach dem Trocknen mit einem Polystyrol-Nanofaser-Vlies in einer Materialstärke von 1 mm ausgerüstet (Sandwich-Anordnung senkrecht zur Wärmestrom-Richtung). Die anschließend gemessene Wärmeleitfähigkeit betrug $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20 \text{ W}/(\text{mK})$. Damit wurde die Wärmeleitfähigkeit in Wärmestromrichtung um 46 % abgesenkt.

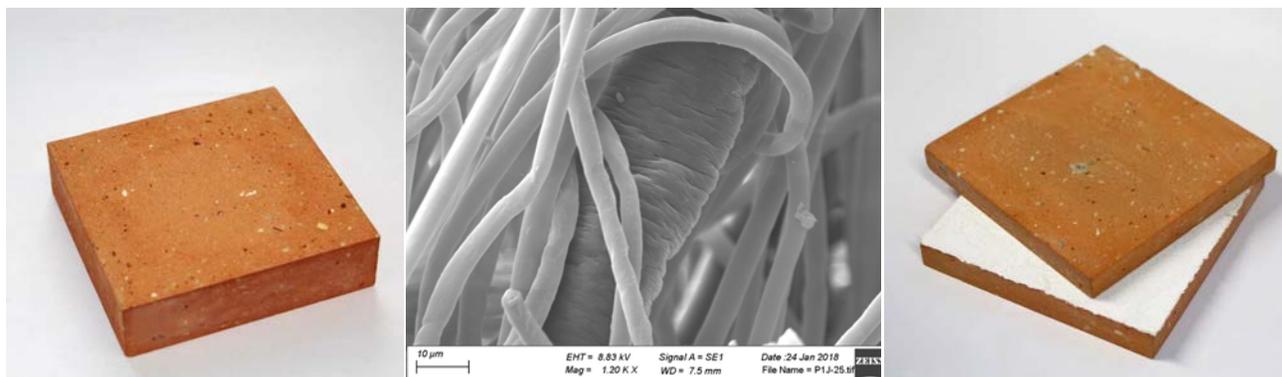


Abb. 4: Ziegelplatte mit einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,37 \text{ W}/(\text{mK})$ (Links); REM-Aufnahme der eingesetzten Polystyrol-Nanofasern in 1200-facher Vergrößerung (Mitte); durchgesägte Ziegelplatte mit eingelegtem Polystyrol-Nanofaser-Vlies in Sandwich-Anordnung mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der gesamten Sandwich-Platte von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20 \text{ W}/(\text{mK})$ (Rechts)

Die kontinuierlich hergestellten Nanofasern haben Durchmesser zwischen wenigen Hundert Nanometern und einem knappen Mikrometer. Die Dichte des hier verwendeten Polystyrol-Nanofaser-Vlies beträgt $0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$. 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 Platzwechsellvorgänge der Gasmoleküle behindert sind. Bedingt durch die zweidimensionale Ausrichtung der Nanofasern im Vlies entsteht eine anisotrope Ausrichtung des Wärmestroms in Faserrichtung. Beim Einbau der Vliese senkrecht zur Wärmestromrichtung wird der Wärmestrom zweidimensional am Wandbaustoff entlang geleitet, so dass in Richtung der Mauerwerksstärke (Wärmestromrichtung) ein deutlich geringerer Wärmestrom fließt. Im Rahmen der Projektaufgaben erfolgte die wärmetechnische Optimierung weiterer Massivwandbaustoffe durch Anordnung der Nanofaser-Vliese in

Sandwich-Bauweise senkrecht zur Wärmestromrichtung (Abb. 5). Je nach Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs resultiert eine unterschiedlich hohe Absenkung der Wärmeleitfähigkeit (Tab. 1).

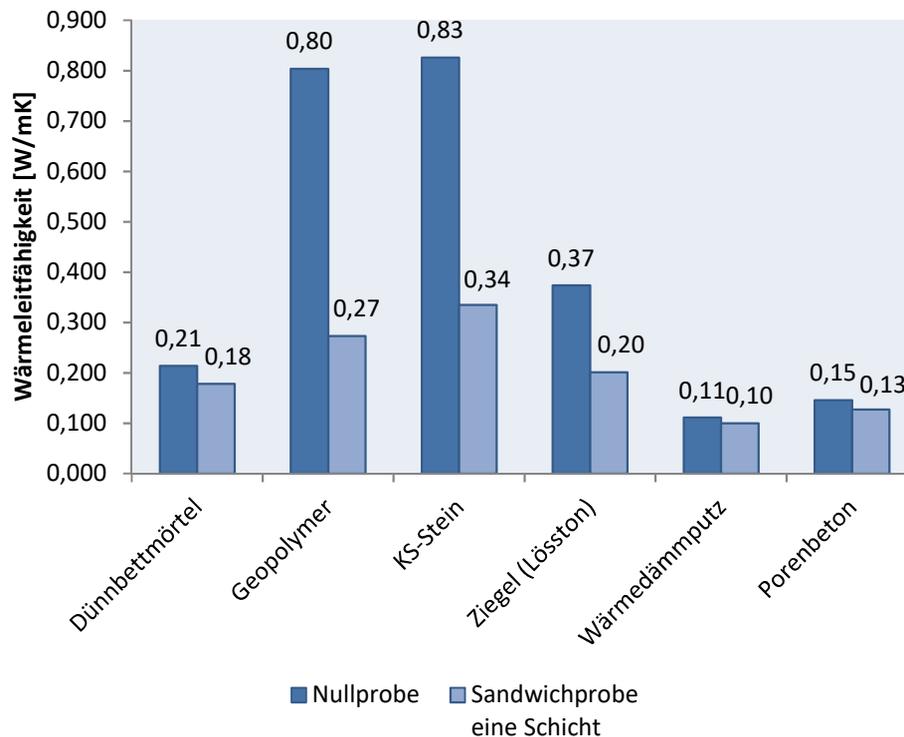


Abb. 5: Wärmeleitfähigkeiten von Baustoff-Sandwich-Anordnungen mit eingebautem Nanofaser-Vlies senkrecht zur Wärmestromrichtung im Vergleich mit den Nullproben

Die geringste Absenkung der Wärmeleitfähigkeit zeigt sich mit 9 % beim Wärmedämmputz. Die höchste Absenkung der Wärmeleitfähigkeit wird bei der Geopolymer-Probe mit 66 % erzielt. Die Versuche werden fortgeführt.

Tab. 1: Prozentuale Absenkung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ ausgewählter Wandbaustoffe bei Ausrüstung mit einem Nanofaser-Vlies senkrecht zur Wärmestromrichtung

Baustoff	Nullprobe	Sandwich-Probe	Absenkung
	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	
Dünnbettmörtel	0,21	0,18	14
Geopolymer	0,80	0,27	66
KS-Stein	0,83	0,34	46
Ziegel	0,37	0,20	59
Wärmedämmputz	0,11	0,10	9
Porenbeton	0,15	0,13	13

Teil 2: Nanofaser-verstärkte Silica-Aerogele

Ein weiteres Forschungsziel ist die mechanische Verstärkung von Silica-Aerogelen durch polymere Nanofasern. Silica-Aerogele sind mesoporöse Materialien, die sich aus einem dreidimensional vernetzten Gerüst aus amorphen SiO₂-Partikeln aufbauen (Abb. 6). Die „perlenkettartige“ Struktur lässt sich dabei mit einem äußerst geringen Feststoffanteil synthetisieren, sodass die Rohdichten von Silica-Aerogelen lediglich zwischen $\rho = 1 - 500 \text{ mg/cm}^3$ betragen. Die Kombination aus Nanoporosität und geringer Dichte führt zu äußerst niedrigen Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda = 0,014 - 0,02 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$. Derart geringe Wärmeleitfähigkeiten werden bisher von keinem anderen Feststoff erreicht. Bei den 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 (Abb. 8). 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.

"Perlenkettenstruktur"

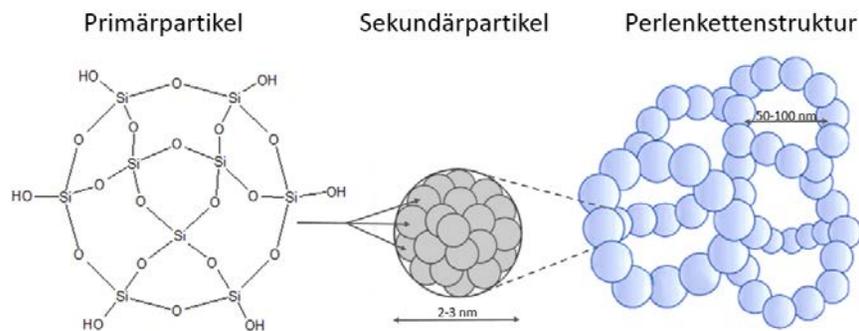


Abb. 6: Schematischer Aufbau eines Silica-Aerogels. Die Sekundärpartikel sind über schmale Kontaktthäse miteinander verknüpft und bilden ein mesoporöses Netzwerk.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung des mechanischen Eigenschaftsprofils von Aerogelen besteht in deren Kombination mit polymeren Nanofasern auf Basis von recyceltem Styropor (Polystyrol). Im Rahmen des Nano-FIM Projektes werden Aerogel-Nanofaser-Komposite entwickelt. Ziel ist die Verbesserung der mechanischen Stabilität der Aerogele durch Nanofaser-Verstärkung bei gleichzeitiger Erhaltung der Wärmedämmeigenschaften. Hierzu wurden mehrere Ausgangsrezepturen für die Aerogel-Synthese entwickelt. Die Rezepturen unterscheiden sich durch die eingesetzten Silica-Präkursoren und die jeweiligen Syntheseparameter. Dabei war eine reproduzierbare, schnelle und möglichst kostengünstige Herstellung monolithischer Silica-Aerogele das Ziel. In der nachfolgenden Tab. 2 ist beispielhaft eine der erarbeiteten Rezepturen für ein auf Tetraethylorthosilicat (TEOS) basierendes Silica-Aerogel aufgeführt.

Tab. 2: Syntheserezeptur für die Herstellung von Silica-Aerogelen. Neben dieser Rezeptur wurden noch zwei alternative Ansätze auf Basis von Tetramethylorthosilikat sowie auf Basis von Wasserglas entwickelt.

Prekursor	Lösungs- mittel	Saurer Katalysator	Basisches Katalysatorsystem		Hydrophobierung		
			NH ₄ OH- Lösung	NH ₄ F- Lösung	HMDSO	Isopropanol	n-Hexan
TEOS 99,8 %	Ethanol 100 %	Oxalsäure- Lösung 0,001 M	1 M	0,1 M	> 98 %	98 %	98 %
30 ml	85,2 ml	7,2 ml	2,0 ml	0,2 ml	60 Vol.-%	30 Vol.-%	10 Vol.-%
Mol-Verhältnis bezogen auf TEOS					Mol-Verhältnis bezogen auf Hexamethyldisiloxan (HMDSO)		
1	10,81	0,40	0,11	0,01	1	1,39	0,29

Außerdem wurde ein Autoklav zur Trocknung der Silica-Alkogelee durch superkritisches CO₂ in Betrieb genommen (Abb. 7). Der Autoklav arbeitet in einem diskontinuierlichen Verfahren, dessen Prozessparameter durch Versuchsreihen schrittweise so optimiert wurden, dass keine prozessinduzierten Risse in den Aerogel-Monolithen auftreten.

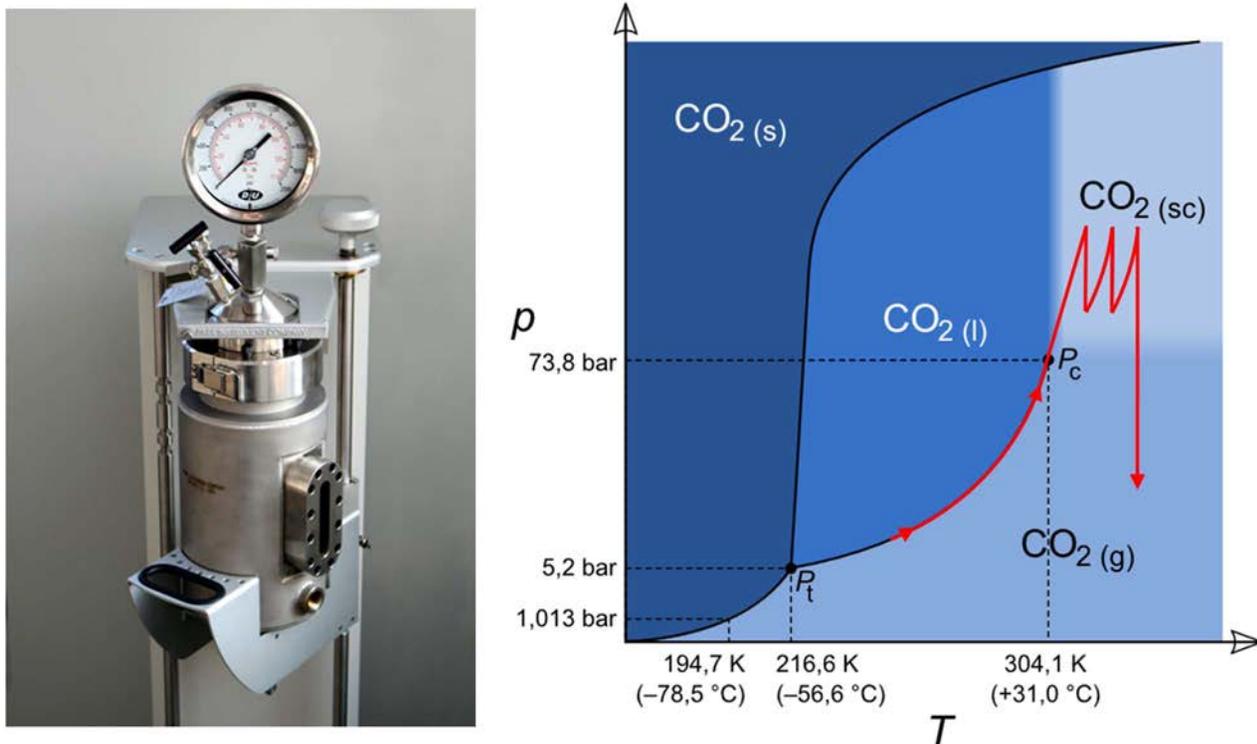


Abb. 7: Links: Autoklav für die überkritische Trocknung der hergestellten Silica-Aerogele. Rechts: Schematische Darstellung des Druck- und Temperaturverlaufs während der Aerogel-Trocknung durch superkritisches CO₂.

Bisher wurden reproduzierbare Aerogel-Monolithe mit Rohdichten von nur 100 mg/cm³ hergestellt (Abb. 8). Messungen mittels BET-Gasadsorption ergaben eine außergewöhnlich große Oberfläche von 733 m²/g im Porensystem. Dies bestätigt die für Aerogele typische mesoporöse Struktur.

Die nächsten Arbeitsschritte umfassen die thermische und morphologische Charakterisierung der hergestellten Aerogel-Nullproben sowie die sich anschließende Synthese von Aerogel-Nanofaser Verbundwerkstoffen. Hierbei sollen sowohl Kurzfasern in variierenden Masseanteilen sowie Fasermatten zum Einsatz kommen.



Abb. 8: Beispiele für synthetisierte Silica-Aerogel Monolithe. Die leichte Blaufärbung entsteht durch Raleigh-Streuung und ist ein Indiz für die vorliegende Mikrostruktur, die sich aus den nur wenige Nanometer großen Primär- und Sekundärpartikeln aus Silikat-Einheiten aufbaut. Ein mögliches Anwendungsbeispiel ist die Verfüllung von Ziegeln.

Die Arbeiten wurden von einem Doktoranden, einem weiteren Mitarbeiter sowie von zwei Werkstudenten ausgeführt. Im Berichtszeitraum erfolgten außerdem Untersuchungen in einem weiteren öffentlichen Forschungsvorhaben sowie einem Industrieprojekt. Darüber hinaus wurde ein weiteres öffentlich gefördertes Forschungsvorhaben eingeworben. Die Arbeitsgruppe bestand insgesamt aus 5 Mitarbeitern und 4 Master-Studierenden. In 2018 wird die Arbeitsgruppe auf 7 Mitarbeiter zuzüglich Master-Studierende vergrößert.

1.2 Teilautarke adaptive Technikfassade

1.2.1 Entwicklung von Stromversorgungskonzepten für Fassaden mit integrierter organischer gedruckter Photovoltaik;

Technische Hochschule Nürnberg - Fakultät Energietechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Günter Kießling und M.Sc. Kyriaki Koutrouveli

Organische gedruckte Photovoltaik erreicht in Fassadenanwendungen eine signifikant andere Flächenleistungsdichte als konventionelle Si-PV. Zusammen mit den Randbedingungen bei der Montage von vorgefertigten Fassadenelementen ergeben sich Anforderungen an die Elektrik, die den Einsatz eines elementbezogenen DC-Netzes nahelegen, das ohne Elektrofachkräfte installiert werden soll. Im Berichtsjahr wurden hierfür zur Vorbereitung erste Voruntersuchungen mit nur geringem Personaleinsatz durchgeführt.

Aus einer vorhandenen, in Betrieb befindlichen PV-Anlage wurde ein String separiert und über einen DC-Steller in ein Pilot-DC-Netz einer Industrieanlage eingespeist. Dabei zeigten sich die Regelung des Leistungsflusses im DC-Netz, aber auch die Störspitzen in der Spannung im DC-Netz als Herausforderungen (Abb. 9). Dies gab den Anstoß für die fundierte Untersuchung zur Dimensionierung von passiven DC-Filterkreisen zwischen der Leistungselektronik und dem DC Netz. Die Arbeitsgruppe bestand im Berichtszeitraum 2017 aus 2 Master-Studierenden und der wissenschaftlichen Betreuung.

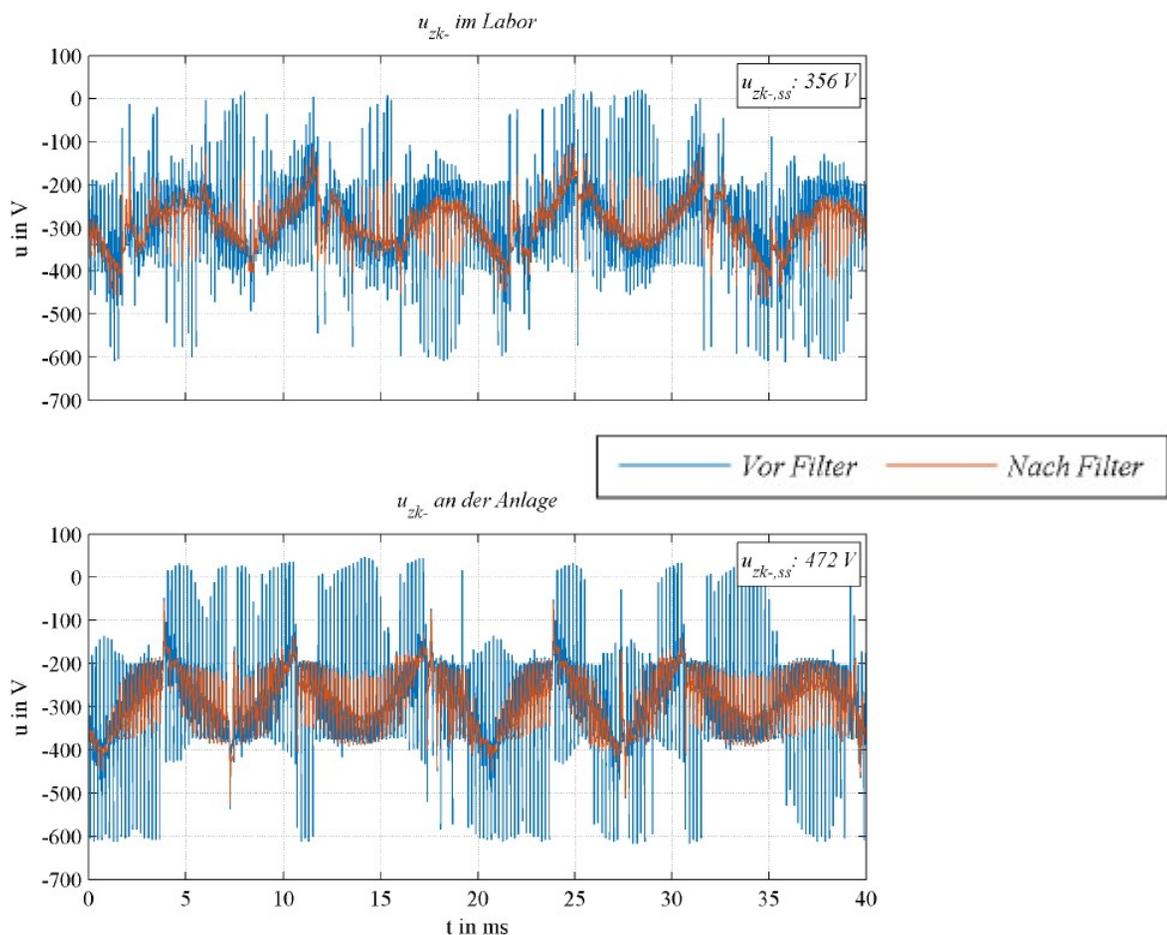


Abb. 9: Spannung eines Pols im DC-Netz von und nach dem DC-Filter Oben: im Laboraufbau / Unten: in der Industrieanlage

Mit diesen Vorarbeiten im Arbeitspaket 2.1 wurde im Berichtszeitraum der Beitrag des Elektrotechnik-Anteils in den Förderantrag „Fassade³“ eingebracht, der Ende 2017 genehmigt wurde und im AP 2.3.2 beschrieben ist. Durch inhaltliche und personelle Kombination beider Projekte können in 2018-2020 der Personaleinsatz und die Forschungsintensität deutlich gesteigert werden.

1.2.2 Konstruktive Entwicklung und bauphysikalische Bewertung von energieadaptiven, modularen Technikfassaden; *Fraunhofer-Institut für Baustoffphysik (IBP) und TH Nürnberg - Fakultät Maschinenbau / Versorgungstechnik, Prof. Dr. Gunnar Grün und M. Eng. Simone Steiger*

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.

Das Ziel besteht darin, die PV-Elemente so in ein Fassadensystem zu integrieren, dass sie industriell gebrauchsfertig und hochpräzise produziert und schließlich an der Fassade eingehängt werden können. Hierfür eignen sich vor allem vorgehängte Fassadensysteme, welche häufig auf einem metallischen Grundgerüst basieren – z.B. Glas-Stahl- oder Glas-Aluminium-Fassaden - und meist als Pfosten-Riegel- oder Elementfassaden-Konstruktion ausgeführt werden. Hierfür wurden im ersten Berichtszeitraum die wesentlichen Materialien und Komponenten ausgewählt.

Wesentlich für PV-Fassaden ist die kritische Berücksichtigung des Brandschutzes. PV-Module enthalten typischerweise eine Schicht von in etwa 2 mm Silikon oder ähnlichen brennbaren Materialien, die die eigentlichen PV-Zellen einbetten. Dies ist brennbares Material, so dass ein Modul nicht als nichtbrennbares Bauteil nach Klasse A1 oder A2 angenommen werden kann. Zudem stellen die erforderlichen elektrischen Komponenten, vor allem auch die Kabel mit ihren Umhüllungen, Brandlasten dar. Dies hat unter anderem zur Konsequenz, dass

- tragende Teile nicht aus Leichtmetall (z.B. Aluminium), sondern nur aus Stahl oder Edelstahl verwendet werden können,
- Brandriegel in Höhe der Geschosdecken eingebaut werden müssen, die fest und hohlraumfrei auf der Oberfläche der darunterliegenden Wand aufliegen müssen,
- Elektrokabel über die gesamte Höhe in Brandschutzkanälen verlegt werden müssen.

Nach Analyse unterschiedlicher Möglichkeiten wird hier die Anwendung von Elementfassaden basierend auf vertikalen Lisenen als statische Tragstruktur gewählt. Diese können gleichzeitig für die Kabelführung verwendet werden und erlauben den Abfluss von Regenwasser sowie eine optimierte Montage mittels Einhängbolzen. Üblich ist eine Montage der Lisenen von unten nach oben. Alternativ können die Lisenen auch vom Dachrand abgehängt werden, so dass die Hauptlast über das Dach und nicht die Verankerung in der Unterkonstruktion der Wand abgetragen wird.

Die tragenden Profile werden hier aus Edelstahl (V2A) gewählt, um den Anforderungen aus dem Brandschutz zu genügen: der Schmelzpunkt von Leichtmetallen (z.B. Aluminium: $\Theta = 660 \text{ °C}$, $\lambda = 220 \text{ W/mK}$) ist zu niedrig, zudem wirkt sich die niedrigere Wärmeleitung von Edelstahl ($\Theta = 1400 \text{ °C}$, $\lambda = 21 \text{ W/mK}$) auch hinsichtlich des Wärmeschutzes positiv aus. Die Lisenen werden aus U-Profilen so konstruiert, dass die Integration der Kabelkanäle mit einer Zugänglichkeit von außen ermöglicht wird. Die Kabelkanäle müssen für die feuersichere Einkapselung der Verkabelung als Metall-Brandschutzkanal zur Kapselung von Brandlasten mit aktiver Brandhemmung ausgeführt werden.

Basierend auf diesen Materialien und Komponenten werden im Folgenden, in Abstimmung mit den Erkenntnissen aus der Systemsimulation und der Stromversorgung, der Entwurf des konstruktiven Aufbaus und die einhergehende Integration der Komponenten erfolgen.

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 und M.Sc. Kutralingam Kandasamy*

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. fassadenintegrierte PV-Elemente) zur Steigerung der Effizienz aus und tragen dazu bei, die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung zu realisieren. Vor diesem Hintergrund werden im Forschungsbereich „Entwicklung von Bilanzierungsmethoden für fassadenintegrierte PV-Elemente und energieadaptive Fassaden durch Systemsimulation“ die Forschungsprojekte „IKON“ und „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 „IKON – Intelligente Betriebsführung durch Kommunikation von Produktion und Gebäudetechnik mit einem künstlichen neuronalen Netz“; *Prof. Dr. Arno Dentel und M.Sc. Kutralingam Kandasamy*

Das Forschungsvorhaben „IKON – Intelligente Betriebsführung durch Kommunikation von Produktion und Gebäudetechnik mit einem künstlichen neuronalen Netz“ untersucht den Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur Prognose des thermischen Energiebedarfs von Gebäuden. Mit Hilfe einer modellbasierten Optimierung kann die Betriebsweise des Gebäudes und der technischen Anlagen (bspw. Wärmepumpen) an externe Einflussgrößen, wie flexible Strompreise oder hohe Produktion einer PV-Anlage, angepasst und eine höhere Gesamteffizienz erreicht werden. Eine solche Regel- und Steuerstrategie benötigt jedoch Prognosen des thermischen Energiebedarfs des Gebäudes.

Klassische Modellierungsansätze zur Ermittlung des thermischen Energiebedarfs basieren auf sogenannten Kapazitätenmodellen. Hierbei werden mittels thermischer Kapazitäten und Widerständen die bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes abgebildet. Der Parametrierungsaufwand solcher Modelle ist jedoch verhältnismäßig hoch und muss für jedes Gebäude neu durchgeführt werden. Künstliche neuronale Netze hingegen können mit historisch erfassten Daten trainiert werden und somit das Verhalten des abzubildenden Systems bzw. Gebäudes simulieren. Der Vorteil dieses Modellierungsansatzes ist, dass die Modelle universell anwendbar sind und während des laufenden Betriebs mit neuen Daten aktualisiert werden können.

Im Rahmen des Projekts wurde mit Hilfe der Software MATLAB ein künstliches neuronales Netz erstellt und mit simulierten Daten aus der thermischen Gebäude- und Anlagensimulation TRNSYS trainiert. Hierzu wurde der VDI Raum (VDI 6007) verwendet; die Validierung erfolgte mittels TRNSYS Modell. Die nachfolgende Grafik (Abb. 10) zeigt exemplarisch einen Sommertag des VDI Raums. Hierbei ist die prognostizierte thermische Gebäudelast (Forecast) der simulierten Last aus TRNSYS (Actual) gegenübergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf der Prognose sehr gut mit denen der Simulation übereinstimmt.

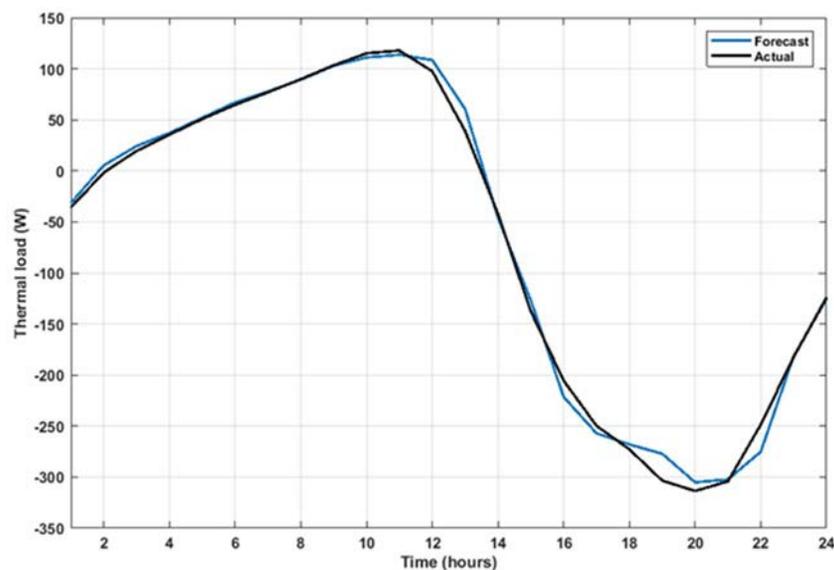


Abb. 10: Vergleich Prognose und Simulation der thermischen Gebäudelast an einem ausgewählten Sommertag

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

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.

Ziel ist die Konzeption eines Fassadenelementes in modularer Bauweise, das im Mehrgeschosswohnungsbau (Neubau und Sanierung) eingesetzt werden kann. Es wird ein integraler Ansatz verfolgt, bei dem das Fassadenelement zu einem intelligenten und aktiven Teil der Gebäudehülle wird. Der Fokus liegt auf der Weiterentwicklung und Demonstration innovativer Komponenten im Bereich der organischen Photovoltaik (OPV) und der nachhaltigen Dämmstoffe, auf der Entwicklung eines selektiven und aktiven Sonnenschutzes sowie auf innovativen Methoden der Regelungstechnik und der Sensorik. Es ist geplant, gedruckte OPV-Module in transparenten als auch in opaken Bauteilen des Fassadenelementes einzusetzen. Die Dämmwirkung der opaken Bauteile wird durch die Verwendung von nachhaltigen Dämmstoffen sichergestellt, die an die Anforderungen im Fassadenbereich adaptiert werden. Selektiv beschichtete textile Sonnenschutzbehänge ermöglichen eine hohe Tageslichtnutzung bei niedrigen solaren Gewinnen, um eine Überhitzung der Räume im Sommer zu vermeiden. Auch die Integration von OPV-Modulen in den Sonnenschutz wird verfolgt. Als Schnittstelle für die Systemregelung kommt ein kostengünstiger Einstrahlungssensor, der im Projekt weiterentwickelt wird, in Verbindung mit einer modellprädiktiven Regelung zum Einsatz. Ein integrales Regelungskonzept, das das Fassadenelement im Zusammenspiel mit dem Gebäude als Gesamtsystem betrachtet, sichert eine optimierte Betriebsführungsstrategie für die einzelnen steuerbaren Komponenten des Fassadenelementes bzw. des dahinterliegenden Raumes. Demonstrationsziel des Projekts ist die Modulfassade an einem mehrgeschossigen Wohngebäude (Abb. 11) zu installieren und mittels eines Intensivmonitorings wissenschaftlich zu begleiten.



Abb. 11: Demonstrationsgebäude der INNOPARK Kitzingen GmbH in Kitzingen

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

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 ist. Die Gebäudehülle wird dabei auf Basis der erfassten Aufnahmen in dreidimensionaler Form rekonstruierbar, so dass diese über eine intuitive Benutzerschnittstelle von allen Seiten aus betrachtet werden und deren Oberflächentemperatur analysiert werden kann.

Vorarbeiten in der vorangegangenen Projektphase befassten sich mit der Detektion von fehlerhaften Modulen in Freiflächen-Photovoltaikanlagen, ebenfalls auf Basis von drohnenbasierten Thermografieaufnahmen (Abb. 12). Für diese Aufgabe war es ausreichend, die gesamte Photovoltaikanlage als annähernd planar zu modellieren. Eine Bestimmung der Flughöhe sowie eine exakte Lokalisierung der Drohne war hier nicht erforderlich. Ein solcher Ansatz ist für die Analyse von Gebäudehüllen nicht mehr möglich. Daher mussten zunächst Verfahren untersucht bzw. entwickelt werden, die auf Basis von Infrarot-Videomaterial eine Rekonstruktion der abgebildeten 3D-Strukturen ermöglichen.

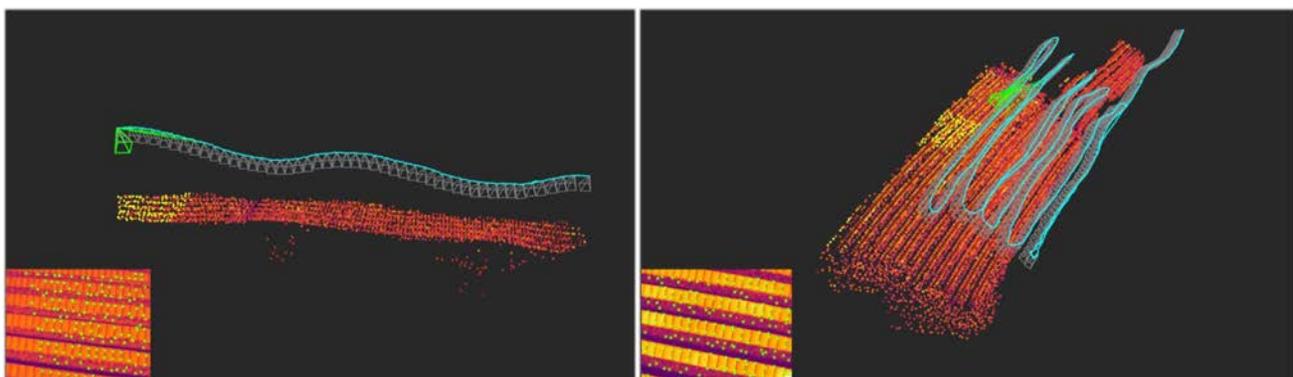


Abb. 12: 3D-Rekonstruktion einer überflogenen PV-Anlage auf Basis thermografischer Videoaufnahmen mittels Semi-Direct Visual Odometry. Die Flugroute der Drohne ist hellblau eingezeichnet. Die grüne Pyramide zeigt die genaue Ausrichtung der Kamera bei der Aufnahme des aktuellen Videoframes (jeweils unten links).

Zunächst wurden im Berichtszeitraum auf Basis der vorhandenen Videoaufnahmen sogenannte SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) auf Ihre Tauglichkeit für den Einsatz zur 3D-Rekonstruktion der Umgebung anhand von Thermografieaufnahmen untersucht. Diese Verfahren sind geeignet, eine 3D-Kartierung einer unbekanntenen Umgebung zu ermöglichen und dabei gleichzeitig die Position und Orientierung der Kamera in dieser Karte zu bestimmen. Während sich mehrere in der Bildverarbeitung verbreitete SLAM-Verfahren, wie z.B. ORB-SLAM, für diese Aufgabenstellung als ungeeignet erwiesen, konnte auf Basis eines erst in jüngster Zeit vorgestellten Verfahrens (Semi-Direct Visual Odometry) mit den Thermografieaufnahmen gute Ergebnisse erzielt werden.

Die Arbeiten werden von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter durchgeführt der im ersten Quartal 2018 seine im Rahmen des EnCN entstandene Dissertation abschließt. Ein Nachfolger ist bereits gefunden und wird ab Februar 2018 die Arbeiten fortsetzen.

1.4 Gemeinschaftsprojekt: „Herzo Base – Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“, TH Nürnberg, Prof. Dr. Dentel, Prof. Dr. Kießling, Prof. Dr. Krcmar, M.Sc. C. Betzold, M.Sc. K. Koutrouveli und M.Sc. N. Hesse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Herzo Base – Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“ (Förderkennzeichen 03ET1364A) erfolgt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aus drei Forschungsbereichen der Technischen Hochschule Nürnberg (Prof. Dr. A. Dentel, Prof. Dr. G. Kießling, Prof. Dr. W. Krcmar) im EnCN. In Projektphase 1 werden Planung, Bau sowie Intensivmonitoring mit Betriebsoptimierung umgesetzt. Im Dezember 2017 wurden die Herzo Base – Energiespeicherhäuser fertiggestellt und von den ersten Bewohnern bezogen (Abb. 13, 14). Aktuell findet das Intensivmonitoring mit Betriebsoptimierung statt. Hierbei werden die berechneten Energieverbräuche mit den realen Energieverbräuchen verglichen. Daher werden energetische Messwerte an signifikanten Stellen der Energiekette (Energieerzeugung, -speicherung, -verteilung und Übergabe) aufgezeichnet. Durch Auswertung dieser Informationen können Optimierungsmöglichkeiten in der Funktionsweise der Anlagentechnik abgeleitet werden. Dies führt zu einem verbesserten Anlagenbetrieb bei gleichzeitiger Steigerung des thermischen Raumkomforts. Somit wird die Nutzerakzeptanz für dieses innovative Anlagenkonzept sichergestellt.



Abb. 13: Ostseite der Herzo Base – Energiespeicherhäuser (Stand: Dezember 2017)



Abb. 14: Technikraum mit Wärmepumpen und Batterie (Stand: Dezember 2017)

1.4.1 Höchstwärmedämmende Baustoffe

Die Gebäudefassaden von 4 Häusern wurden in einschaliger Bauweise mit perlit-gefüllten Poroton-Ziegeln entsprechend dem „Stand der Technik“ erstellt. Bei 4 Vergleichshäusern erfolgte eine zweischalige Bauweise aus perlit-gefüllten Poroton-Ziegeln der Wandstärke 30 cm und einer Wärmedämmfassade (WDF 12) aus CALOSTAT-gefüllten Vorsatzziegeln der Wandstärke 12 cm. CALOSTAT ist ein neuartiger Dämmstoff der Evonik Industries AG. Er besteht aus pyrogener Kieselsäure, die sich durch eine Wärmeleitfähigkeit von nur $\lambda = 0,019 \text{ W}/(\text{mK})$ auszeichnet, während Styropor bzw. Perlite nur eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ bzw. $\lambda = 0,040$ bis $0,060 \text{ W}/(\text{mK})$ aufweisen (Abb. 15).



Abb. 15: CALOSTAT-gefüllter WDF 12 Ausgleichsziegel (Links). Zweischalige Bauweise mit 30 cm dicken perlit-gefüllten Mauerziegeln und 12 cm dicken CALOSTAT-gefüllten WDF 12 Vorsatzziegeln (Mitte). Zweischalige Bauweise im Eckbereich des Erdgeschoss (Rechts).

Diese Kombination höchsteffizienter Dämmstoffe mit einem hochwärmedämmenden Ziegelmauerwerk zeichnet sich im Vergleich zur einschaligen Bauweise nach dem Stand der Technik durch einen um 14,5 % niedrigeren U-Wert bei gleicher Mauerwerksdicke aus. Der schon sehr niedrige U-Wert von $0,152 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ des Mauerwerks von Haus Nr. 8, errichtet aus dem Ziegelstein Poroton T-7 in einer Steinbreite von 42,5 cm, konnte im symmetrisch gegenüberliegenden Haus Nr. 1 durch zweischalige Bauweise mit dem Ziegelstein Poroton T-8 (Steinbreite: 30 cm) und zusätzlicher, außenliegender WDF Fassade (12 cm) mit CALOSTAT-Füllung (= 42 cm) auf $U = 0,130 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ weiter reduziert werden.

Abb. 1 zeigt das thermische Verhalten zweier Versuchswände, die im Technikum des EnCN errichtet, mit Temperatursensoren in Abhängigkeit von der Mauerstärke ausgerüstet und mit einer „von außen“ aufgezwungenen Temperaturmodulation eines Sommertages beaufschlagt wurden. Das linke Bild zeigt den Temperaturverlauf in einer Wand aus perlit-gefüllten Poroton-Ziegeln T-7 der Steinbreite 36,5 cm. Das rechte Bild zeigt den Temperaturverlauf in einer zweischalig aufgebauten Wand aus einer CALOSTAT-gefüllten Wärmedämmfassade (WDF 12 cm) und einer dahinterliegenden Wandscheibe aus perlit-gefüllten Poroton-Ziegeln T-8 der Steinbreite 30 cm. Diese Wand wurde ebenfalls „von außen“, also CALOSTAT-seitig, mit einer aufgezwungenen Temperatur-Modulation eines Sommertages beaufschlagt. Die Grafiken (Abb. 16) zeigen die zeitlichen Temperaturschwankungen über einen ganzen Tag (24 h) in Abhängigkeit vom Mauerwerksquerschnitt, beginnend bei Mauerwerksaußenseite, im CALOSTAT-Dämmstoff, in den Perlite-Kammern 7, 6, 5 bzw. 4 bis hin zur Ziegelinnenseite. Während die außenseitige Mauerwerk-Temperatur (rote Linie) in beiden Mauerwerken am weitesten schwingt, zeigen die Temperaturen in der Calostat-Wärmedämmfassade

bzw. in der äußersten 7. Perlit-Reihe (orange Linie) jeweils die erste Temperaturdämpfung. Diese Dämpfung setzt sich, je weiter der Wärmestrom zur innenseitigen Ziegelwand gelangt, zunehmend fort. Die jeweils niedrigste Temperaturschwankung zeigen beide Ziegelwände bei der innenseitigen Wandtemperatur.

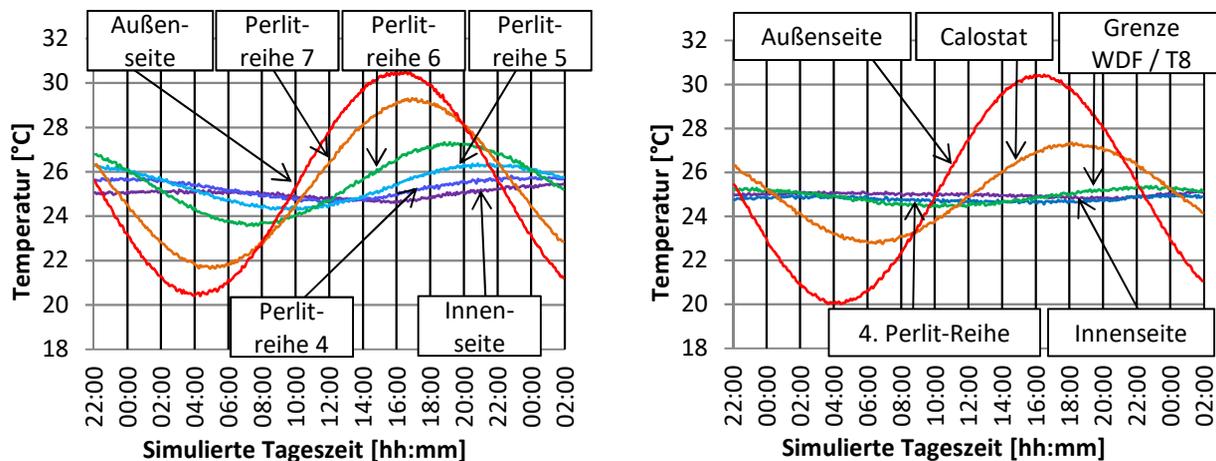


Abb. 16: Temperaturverläufe in Steinbreite zweier Wandaufbauten im Technikum bei vorgegebener Außentemperatur im Vergleich; Aufgezwangene außenseitige Temperaturmodulation eines Sommertages an den Mauerwerken aus Poroton T-7 in Steinbreite 36,5 cm (links) und bei der Kombination aus CALOSTAT-gefüllter Wärmedämmfassade WDF 12 cm und Poroton T-8 in Steinbreite 30 cm (rechts)

Im Vergleich beider Wandaufbauten fällt auf, dass die fortschreitende Temperaturdämpfung bei der einschaligen Bauweise mit dem Poroton T-7 von der Außenseite bis zur 4. Perlit-Kammer einen nahezu linearen Verlauf aufweist. Bei der zweischaligen Bauweise mit Wärmedämmfassade und Poroton T-8 erfolgt die größte Temperaturdämpfung zwischen der Außenseite des WDF-Ziegels, über den Calostat-Dämmstoff bis hin zur Grenzfläche des WDF-Ziegels zum Poroton T-8. Im anschließend platzierten perlit-gefüllten Poroton T-8 ist die von außen aufgezwungene Temperaturschwingung schon soweit abgedämpft, dass sich nur noch minimale Veränderungen ergeben. Der zeitliche Vergleich der Innenwandtemperaturen beider Ziegelmauerwerke zeigt beim einschaligen Mauerwerk einen 2,2-fach höhere Temperatur-Hub ($\Delta T_{T-7 \text{ Innen}} = \pm 0,44 \text{ K}$) als beim zweischaligen Aufbau ($\Delta T_{\text{WDF/T8 Innen}} = \pm 0,20 \text{ K}$).

Aus dem Vergleich der thermischen Kennwerte geht hervor, dass der Höchstleistungs-dämmstoff CALOSTAT im zweischaligen Wandaufbau, insbesondere zwei bedeutende wärmetechnische Verbesserungen gegenüber dem einschaligen Wandaufbau bewirkt. Zum einen wird der U-Wert auf 0,13 W/(mK) vergleichsweise sehr viel weiter abgesenkt, so dass die verbesserte winterliche Wärmedämmung eine vergleichsweise bessere wärmetechnische Effizienz der Gebäudehülle bewirkt. Zum zweiten können Wärmeimpulse die von der Außenseite auf das Gebäude wirken (z.B. ungewünschte solare Gewinne) vergleichsweise stärker abgedämpft werden. Dies kann besonders während der Sommermonate, durch den dann vorliegenden niedrigeren Kühlbedarf der Häuser, eine zusätzliche Energieeinsparung bewirken sowie die thermische Behaglichkeit im Gebäude verbessern.

1.4.2 Gebäudetechnik: Vergleich der optimierten Steuerung mit einer Standardsteuerung

Der wesentliche Schwerpunkt der Gebäudetechnik liegt auf der Entwicklung einer Betriebsführungsstrategie 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 der Betriebsführung berücksichtigt. Die Entwicklung der Betriebsführung erfolgte mit der Simulationssoftware TRNSYS. Hierhin sind die acht Reihenhäuser sowie die gesamte Anlagentechnik abgebildet. Das Ziel der Betriebsführungsstrategie (DMS) ist es, den Verbrauch der PV-Erzeugung zu optimieren, indem diese die Wärmepumpen an die verfügbare PV-Leistung anpasst und die Kapazität der thermischen Speicher durch Temperaturerhöhung erweitert.



Die DMS wurde mit einer Standardregelung für Wärmepumpen verglichen (Abb. 17). Die Standardregelung umfasst eine wärmegeführte Regelung der Wärmepumpen ohne Erhöhung der Speicherkapazität. Zudem sind die Wärmepumpen nicht stufenlos schaltbar. Der Vergleich der beiden Varianten zeigt, dass der PV-Strom-Direktverbrauch um 21 % erhöht werden konnte. Dabei sank die Batterieladung um 10 % und die Netzeinspeisung um 11 %. Zudem konnte der Coup of Performance (COP) der MWP von 4.3 auf 5.3 erhöht werden. Im Vergleich zur Standardvariante reduzierte sich die maximale Lastspitze von 32 kW auf 24 kW. Das ist eine Verringerung der maximalen Lastspitze und des Leistungsanteils in den Strombezugskosten um 24 %.

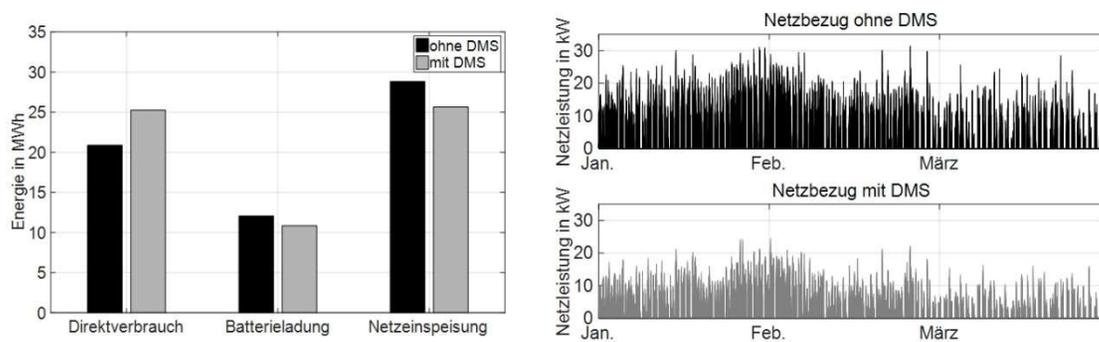


Abb. 17: Erhöhung des PV-Eigenanteils und Reduzierung von Lastspitzen bei Einsatz der DMS

1.4.3 Elektrotechnik: Entwicklung einer optimierten Betriebsstrategie des Batteriespeichers, einschließlich Mess- und Abrechnungskonzept

Die Standard-Steuerung der Batteriewechselrichter erlaubt das Batterieladen bzw. –entladen auch mit geringen Leistungswerten von 10 W. Der schlechte Wirkungsgrad der Wechselrichter auf solchen Leistungsniveaus macht jedoch seinen Betrieb unwirtschaftlich. Deshalb wurden Mindestleistungswerte definiert und eine optimierte Betriebsführungsstrategie für das Batteriespeichersystem entwickelt. Sie teilt sich in zwei Teile auf: Normal-Betrieb und Lastspitzenkappung und erfolgt durch die Fernsteuerung der Batteriewechselrichter durch die Gebäudeautomatisierung. Während des Normal-Betriebs wird der Batterieumrichterbetrieb erst freigegeben, wenn die Mindestnetzbezugsleistung bzw. Mindesteinspeiseleistung, um das Wechselrichtersystem wirtschaftlich zu betreiben, überschritten wird. Diese Mindestwerte entsprechen einem Wechselrichterwirkungsgrad von ~92 %. Daher wird der Bereich schlechter Wirkungsgrade von der Gebäudeautomatisierung blockiert. Des Weiteren, um die Selbstverbrauchsverluste im Bereitschaftszustand nachts zu vermeiden, wechselt die Batterie nachts durch die Aktivierung des zeitgesteuerten Betriebs des Wechselrichtersystems in Standby Modus, um Energie zu sparen. Dadurch sinkt der Selbstverbrauch der Wechselrichter von 78 W auf nur 12 W für ca. 6 Stunden jeden Tag. Die neue Betriebsführung führt zu einer sinnvolleren Nutzung der Batterie und der Minimierung der Wechselrichterverluste im Vergleich zum Standardbetrieb.

Die geplante Lastspitzenmanagement-Strategie (d.h. die Kappung von Netzbezugsleistungsspitzen am Netzanschlusspunkt) wurde so definiert und geplant, dass die Netzbezugskosten minimiert werden. Sie besteht aus der Kombination der Leistungsbeeinflussung von abschaltbaren elektrischen Verbrauchern und der Nutzung der Reservekapazität der Batterie. Sie lässt sich durch vier Stufen realisieren (Abb. 18). Das Lastspitzenmanagement wird aktiviert, wenn eine drohende 15 min-Leistungsspitze am Netzanschlusspunkt erkannt wird.

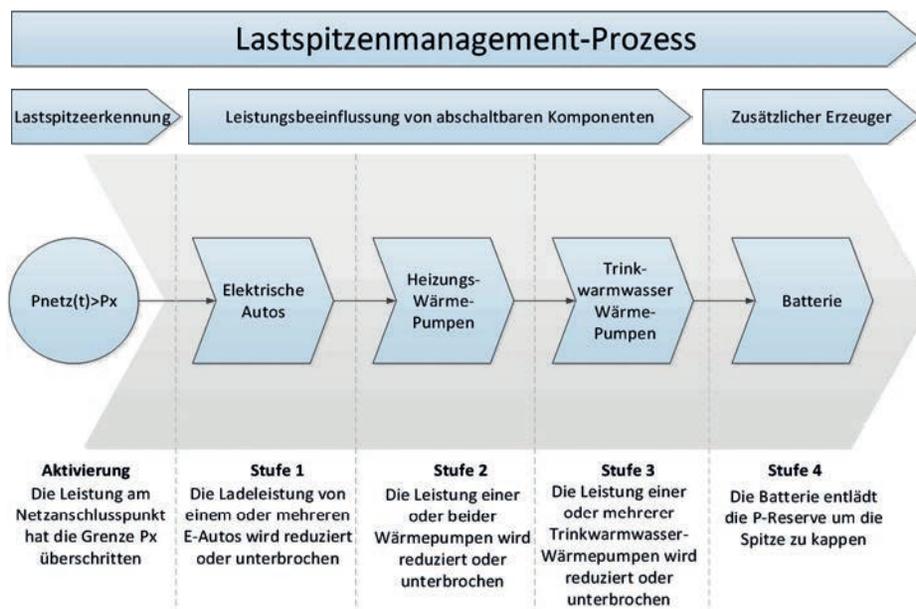


Abb. 18: Darstellung des Lastspitzenmanagement-Konzepts

Die Kombination der von der Wohneigentümergeinschaft (WEG) gemeinsam betriebenen elektrischen und thermischen Komponenten und den privaten Haushaltsverbrauchern war der Ausgangspunkt für die Entwicklung eines innovativen Abrechnungskonzepts mit dem Ziel der Optimierung der Haushaltsstromrechnungen durch die geringere EEG-Umlage für Eigenverbrauch des erzeugten PV-Stroms.

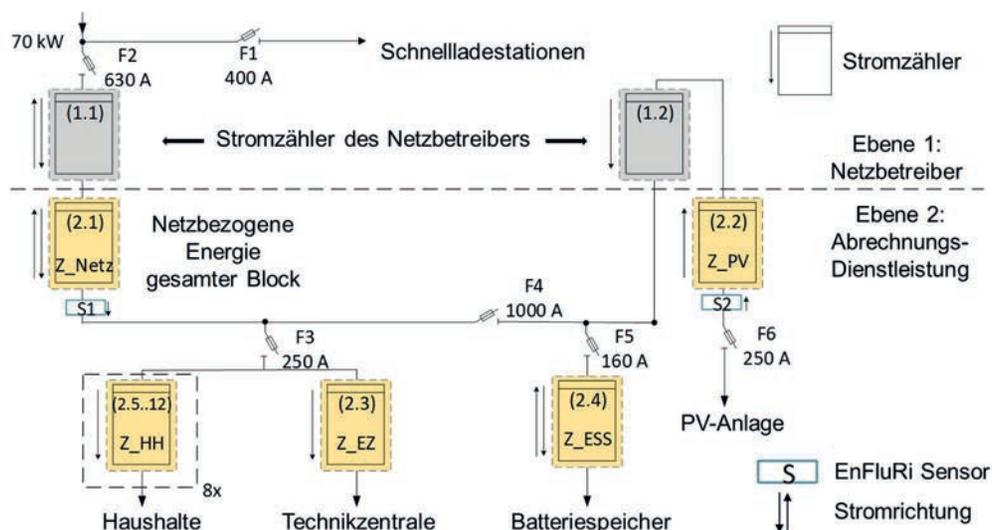


Abb. 19: Mess- und Abrechnungskonzept durch intelligente Verbrauchsmessung.

Für die Implementierung des Abrechnungskonzeptes wurde das in Abb. 19 gezeigte Messkonzept entwickelt und umgesetzt, da für die Kombination von Eigenverbrauch und Lieferung noch keine VDE Empfehlungen vorliegen. Die Stromzähler der Ebene 1 werden vom Verteilnetzbetreiber zur Erfassung von Strombezug und -einspeisung des gesamten Gebäudes betrieben. Der aus dem Netz bezogene Strom wird an die WEG geliefert, die hier als der einzige Stromkunde des Stromlieferanten betrachtet wird. Die Stromzähler der Ebene 2 werden für die Erstellung der Stromabrechnungen für die einzelnen Haushalte sowie für die WEG verwendet. Eine Kombination von RLM-Zähler (registrierte Leistungsmessung), die die gesamte Energieerzeugung und -verbrauch im Gebäude durch registrierende

Leistungsmessung als Lastprofil ermitteln können (2.1 bis 2.4) und SLP-Zähler (Standard-Lastprofil) zur Erfassung des individuellen Haushaltsstromverbrauchs (2.5 bis 2.12) wurden umgesetzt.

2 Innovative energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasen- maschinen; *Technische Hochschule Nürnberg – Fakultät Energietechnik, Feinwerktechnik und Informationstechnik; Prof. Dr. Andreas Kremser, M.Sc. Richard Steckel und M.Sc. Tobias Gerlach*

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

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

Die Auslegung großer Niederspannungsmaschinen für Umrichterspeisung ist technologisch sehr anspruchsvoll. Die erforderlichen kleinen Windungszahlen stellen hohe Anforderungen an die Wicklungstechnologie und führen zu hohen Leiterquerschnitten, was wiederum ein Ansteigen der Verluste durch Stromverdrängung zur Folge hat. Eine einfachere Wicklungsauslegung, besseres Betriebsverhalten und geringere Verluste können mit mehrsträngigen Maschinen erreicht werden. Vorteile sind insbesondere:

- Reduktion der Ständerstromwärmeverluste um 10 bis 20 %
- bei gleicher Strombelagsamplitude eine höhere Luftspaltinduktion
- verringerte Stromwärmeverluste im Läufer
- geringere Pendelmomente
- geringere Geräusche
- Betrieb auch bei Phasenausfall möglich

Insbesondere für Niederspannungsmaschinen existiert ein hohes Potential zur Wirkungsgradsteigerung. Die Steigerung des Wirkungsgrades von wenigen Prozentpunkten bedeutet gleichzeitig auch eine Reduzierung der Verluste um 10-20 %. Ziel ist ein modulares System aus mehrsträngigen Induktionsmaschinen verschiedener Baugrößen (160 bis 450) mit herkömmlichen Industriestromrichtern zu speisen, um den Einsatz dieses Antriebssystems mit seinen Vorteilen insbesondere der Energieeffizienz in der industriellen Praxis zu ermöglichen.

Arbeiten und Ergebnisse

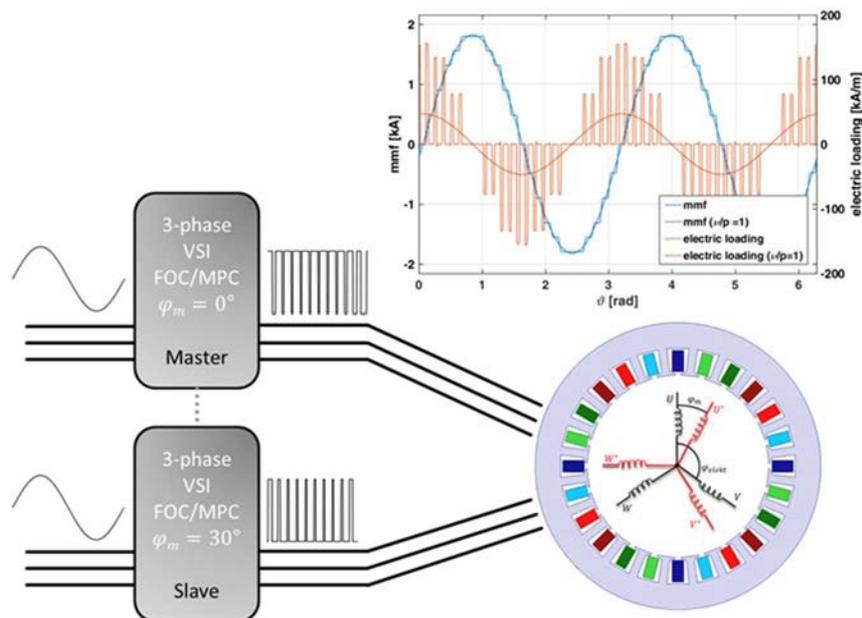


Abb. 20: Schematische Darstellung eines mehrphasigen Industrieantriebs mit Niederspannungsmaschine mit Strangzahl $m = 2 \cdot 3$ bei Betrieb an zwei baugleichen Spannungszwischenkreisumrichtern

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 $m = k \cdot 3$. Abb. 20 zeigt eine schematische Darstellung einer Mehrphasenmaschine mit Strangzahl $m = 2 \cdot 3$ betrieben an zwei Spannungszwischenkreisumrichtern. Das Diagramm zeigt den charakteristischen Strombelag sowie die Felderreggerkurve der betrachteten Maschine als Ergebnis einer ersten analytischen Betrachtung.

Weiter konnten anhand einer analytischen Grundwellenbetrachtung auf Basis konventioneller Berechnungsansätze am einsträngigen Ersatzschaltbild für Drehfeldmaschinen wichtige Auslegungskriterien abgeleitet werden. Zudem wurde mittels vereinfachender Annahmen der Randbedingungen analytisch eine Reduzierung der Stromwärmeverluste im Stator von 7 % allein für die Grundschwingung festgestellt.

Zur systematischen Verifikation dieses zunächst vereinfachten analytischen Modells wurde ein semi-analytisches Berechnungsmodell auf Basis nichtlinearer Reluktanznetzwerke zur Nachrechnung des magnetischen Kreises der betrachteten Mehrphasenmaschine erstellt. Die Besonderheit der entwickelten Berechnungsmethode ist eine Trennung der Reluktanznetzwerke im Luftspalt. Die Kopplung der Netzwerke wird über die Durchflutungsverteilung im Luftspalt realisiert, welche eine aufwendige Vernetzung des Luftspaltbereichs überflüssig macht. Die Analogie zwischen Ohm'schem und Hopkingschem Gesetz erlaubt eine Anwendung des Knotenpotentialverfahrens auf lineare magnetische Netzwerke. Ein iteratives Näherungsverfahren zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems verwendet aus Stabilitätsgründen eine linear gewichtete gleitende Mittelwertbildung über eine endliche Anzahl durchgeführter Iterationen. Dieses Verfahren bietet eine Nachrechnung des magnetischen Kreises mit ausreichender Genauigkeit und ermöglicht in der Auslegungsphase Parametervariationen mit deutlich geringerer Rechenzeit zu lösen, als vergleichbare numerische Verfahren, wie beispielsweise die Finite Elemente Methode (FEM). Die Ergebnisse des vereinfachten analytischen Modells konnten damit bestätigt werden.

Numerische Berechnungsverfahren werden herangezogen, um die Genauigkeit der Vorausberechnung weiter zu steigern. Dies geschieht im Elektro-Maschinenbau typischerweise mittels der Finite Elemente Methode. Die damit verbundenen

extrem langen Rechenzeiten werden durch eine vorgelagerte Grobauslegung deutlich reduziert. Der Parameterraum einer geeigneten Auslegung wird zunächst für die geforderte Applikation mit Mehrphasenmaschinen mittels des (semi-)analytischen Modells eingegrenzt. So entsteht ein mehrstufiger Auslegungsprozess, welcher als Ergebnis des ersten Förderjahres in eine zu diesem Zweck entwickelte Berechnungsplattform für mehrphasige Industrieantriebe integriert wurde. Die aufwendige Modellerstellung wurde dabei vollautomatisiert, um den Transfer dieser innovativen Antriebstechnologie in die Industrie zu erleichtern und Vorausberechnungen verschiedener Maschinenkonfigurationen zu ermöglichen.

Kooperationen

Innerhalb des EnCN ist der Themenbereich der Mehrphasenmaschine sehr eng mit dem Teilprojekt 3 vernetzt. Hierbei soll die Mehrphasenmaschine mit der modell-prädiktiven Regelung (MPC) als Ansteuerverfahren betrieben werden. Zum aktuellen Zeitpunkt wird ein Umrichtersystem entwickelt, welches in Zusammenspiel mit der Zynq Berechnungsplattform die Mehrphasenmaschine ansteuert. Anschließend soll auf diese Plattform die modellprädiktive Regelung implementiert werden, um die MPC als geeignetes Ansteuerverfahren für Mehrphasenmaschinen bewerten zu können.

Wie bereits in der ersten Förderphase sind im Jahr 2017 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. 21):



Abb. 21: Kooperationspartner aus Industrie und Wissenschaft

Zwei Projekte hinsichtlich der Bestimmung umrichterbedingter Zusatzverluste durch Spannungszwischenkreisumrichtern in elektrischen Maschinen und der Untersuchungen von Verlusten in oberflächenmontierten Permanentmagneten bei PM-Servomaschinen wurden erfolgreich durchgeführt. 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 Elektrolechen 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 der Fördermaßnahme FHInvest durch das BMBF wird das Projekt MeViSys gefördert. Der im EnCN Projekt eingerichtete Motorenprüfstand wird um ein 3D-Scanning Laservibrometer inklusive Rotationsvibrometer zur kontaktlosen Schwingungsmessung erweitert. Diese Messgeräte sind elementarer Bestandteil der Verifizierung der Simulationsmodelle, die zur Untersuchung des Schwingungs- und Geräuschverhaltens elektrischer Maschinen entwickelt werden. Mithilfe dieser Modelle kann die Energieeffizienz von elektrischen Maschinen gesteigert und ihre Schwingungsbelastung verringert werden. Zudem ist es möglich, das Geräuschverhalten zu verbessern.

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, 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 industriennahe Forschungs Kooperationen anzustoßen. Wie in Abschnitt Kooperationen genannt, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungsprojekte sowie Industrieprojekte entstanden.

Ausblick

Zwei Standard-Industriemotoren (BG160) wurden vom Projektpartner SIEMENS AG zur Verfügung gestellt und dienen als Basis für die Fertigung eines ersten Versuchsmusters. Die Maschinen werden zurzeit in der Konfiguration mit drei Strängen an den Motorprüfständen am EnCN vermessen. Anschließend wird die Wicklung eines Versuchsmusters mit Strangzahl $m = 2 \cdot 3$ ausgeführt. So sind zwei baugleiche Drehstrommaschinen mit einer drei- als auch einer mehrsträngigen Wicklungsausführung für Vergleichsmessungen verfügbar, um die entwickelten Ansätze wissenschaftlich fundiert und systematisch zu verifizieren. Eine erste Wicklungskonfiguration ist bereits ausgelegt und wird voraussichtlich Ende des ersten Quartals 2018 gefertigt. Desweiteren wird das Betriebsverhalten am Umrichter zunächst analytisch und numerisch abgebildet. Geeignete Steuerverfahren für Mehrphasenmaschinen (PWM, RZM, MPC etc.) werden untersucht und messtechnisch am Prototyp getestet.

3 Energieeffiziente Ansteuerungskonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme;

Technische Hochschule Nürnberg, Prof. Dr. Armin Dietz, M.Sc. Sebastian Wendel, M.Sc. Philipp Löhdefink und B.Eng. Michael Hoerner

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 Regelalgorithmen zu erforschen und zu entwickeln, die die üblichen regelungstechnischen Anforderungen an Dynamik und Störverhalten erfüllen und darüber hinaus schon direkt im Regelalgorithmus 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 Antriebsstrangs 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 bereits seit 2 Jahren mit neuartigen Regelungsverfahren wie der modellprädiktiven Regelung (MPC). Diese Regelverfahren konnten bereits auf Mikrocontroller experimentell implementiert werden. Dabei wurde festgestellt, dass die komplexen MPC-Algorithmen nicht schnell genug berechnet werden können und die Modellgenauigkeit oft unzureichend ist. Im ersten Jahr der EnCN-Förderphase galt es, diese Modellgenauigkeit zu optimieren.

Bei diesen Forschungsarbeiten wurden die Modelle zur Vorhersage des Maschinenverhaltens mit verschiedener Detailtiefe von den zu betrachtenden Maschinen (v. a. Synchronmaschine, Asynchronmaschine) teilweise neu erstellt, verbessert und erweitert sowie im diskreten Zeitbereich dargestellt. Die größten Herausforderungen lagen hier zum einen in der vorteilhaften Formulierung der Modellgleichungen, sodass möglichst wenige Rechenschritte auf dem Prozessor/FPGA benötigt werden. Zum anderen galt es, die komplexen Verlustmechanismen elektrischer Maschinen (z. B. Reibungs- und Eisenverluste) auf möglichst einfache und dennoch präzise Art abzubilden und in die Prädiktionsmodelle zu integrieren. Gleichzeitig mussten Gütefunktionale zur Auswertung der Prädiktionsmodelle entwickelt werden. Des Weiteren wurden verschiedene Kriterien betrachtet, welche bei dem Betrieb eines Antriebssystems oder anderen leistungselektronischen Systems berücksichtigt werden können (z.B. Schwingungen bei der Zwischenkreisspannung, mechanische Schwingungen an der Antriebsachse).

Die erstellten Modelle und Kostenfunktionen wurden in die Simulationsumgebung (MATLAB/Simulink) überführt. Zusätzlich wurden zwei Regelungsverfahren aus dem Stand der Technik (feldorientierte Regelung und direkte Drehmomentregelung) als Referenzmodelle in der Simulationsumgebung angelegt und in einer Simulations-„Testbench“ der MPC-Regelung gegenübergestellt.

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. 22), das im Folgenden nur noch als Zynq bezeichnet wird. Das Zynq konnte durch sein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis sowie seine hardwaretechnische 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 generiert. 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. 22: Eigenentwicklung eines SoC-Systems für die Implementierung der Regelungs- und Steuerkonzepte 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 synthetisierbarem 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. Hierdurch konnte ein sogenannter „Bitstream“ zur Programmierung des FPGAs erzeugt werden. Die Parametrierung der IP Cores erfolgt über die AXI-Schnittstelle durch den ARM Prozessor. Dieser ermöglicht des Weiteren langsamere Berechnungen zur Laufzeit, z.B. zur adaptiven Nachführung von

Regelungsparametern. Der ARM Prozessor wird durch die SDK, einer ähnlichen Entwicklungsumgebung wie Eclipse, programmiert. Die experimentelle Implementierung und Validierung der Algorithmen ist aktuell Gegenstand der Forschungstätigkeit.

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

Kooperationen

Innerhalb des EnCN ist der Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerungsverfahren sehr eng mit dem Teilprojekt 2 vernetzt. Hierbei soll die MPC als Ansteuerungsverfahren für die in Teilprojekt 2 behandelte Mehrphasenmaschine genutzt werden. Zum aktuellen Zeitpunkt wird ein Umrichtersystem entwickelt, welches in Zusammenspiel mit der Zynq-Berechnungsplattform die Mehrphasenmaschine ansteuert. Anschließend soll auf diese Plattform die modellprädiktive Regelung implementiert werden. 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. Im Themenbereich von Prof. Dr. Dentel sind zwar bedeutend größere Zeitkonstanten wirksam, jedoch sind durchaus Überschneidungen bei der Systematik vorhanden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des EnCN-Teilprojektes zwei neue industrielle Forschungsprojekte beantragt. So wurde zum einen das Forschungsvorhaben „Modellbasierte und intelligente Kleinantriebstechnik“ (MIKA) in Kooperation mit der Afag GmbH und der Kübrich Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG durch den Fördergeber VDI/VDE mit einer Laufzeit von 2,5 Jahren genehmigt. 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.

Zum anderen ist das Forschungsprojekt „Variophasenmaschine“ in Bearbeitung. Bei dieser neuartigen elektrischen Maschine sind massive Leiterstäbe in den Nuten des Stators verlegt. Ein möglicher Lösungsansatz für die Ansteuerung der Vielzahl an benötigten Halbleitern sowie für die erforderlichen Schaltfrequenzen wäre die Verwendung des untersuchten SoC-FPGAs in Kombination mit der modellbasierten Ansteuerung der elektrischen Maschine.

Des Weiteren wirkt seit November 2017 ein Zusammenschluss aus Technischer Hochschule Nürnberg, der Technischen Universität München sowie der Universidad de Santiago de Chile an der Entwicklung einer gemeinschaftlichen Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme auf Basis des Zynq-Ultrascale-SoCs zusammen. Die Zusammenarbeit unter Leitung der Technischen Hochschule Nürnberg hat bereits begonnen und es besteht ebenfalls die Möglichkeit und Zielsetzung für ein gemeinsames Forschungsvorhaben.

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.).

Personal

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Themenbereich der energieeffizienten Ansteuerkonzepte waren drei wissenschaftliche Mitarbeiter, zwei 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 Forschungs Kooperationen anzustoßen. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind hierdurch weitere öffentliche Forschungsprojekte sowie Industrieprojekte entstanden. Hierbei wurde die Idee des EnCN genutzt, um die Thematik „Energieeffiziente Ansteuerkonzepte für Antriebssysteme und leistungselektronische Energiesysteme“ in die Industrie zu übertragen, wodurch weitere EnCN-Mitarbeiter durch industrielle Forschungsprojekte finanziert werden konnten.

Ausblick

Im Jahr 2018 erfolgt die Implementierung des MPC-Algorithmus im Labormaßstab. Hierzu wird ein vorhandener Prüfstand einer kleineren Leistungsklasse für die Anforderungen von MPC umgerüstet. Auf diesem Prüfstand soll die

Implementierung nach dem entwickelten Verfahren (Abb. 23) stattfinden sowie der Vergleich mit dem Stand der Technik am realen Laborsystem.

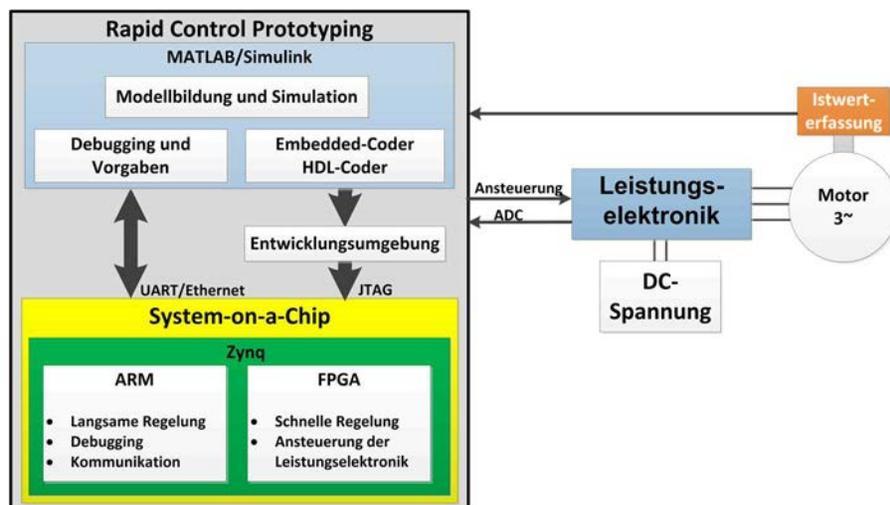


Abb. 23: Rapid Control Prototyping Workflow und Implementierung auf System-on-a-Chip (Zynq) mit Ankopplung an die Leistungselektronik und Motor

4 User Interface Design von Energiedaten in energieintensiven Betrieben;

Hochschule Ansbach, Prof. Dr. Wolfgang Schlüter, M.Eng. A. Buswell, M.Eng. A. Khayatzadeh, B.Eng. J. Krieg und B.Eng. S. Müller

Einführung 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 (Abb. 24). 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.

Im Projekt User Interface Design von Energiedaten wird prototypisch eine Lösung entwickelt, die verschiedenen Nutzergruppen Energiekennzahlen auf mobilen Endgeräten in geeigneter Form zu Verfügung stellt und damit einen energieeffizienteren Betrieb bei hoher Produktionssicherheit ermöglicht. In Untersuchungen mit einer validierten Material- und Energieflusssimulation konnten bereits verschiedene Effizienzmaßnahmen identifiziert und deren Wirksamkeit quantifiziert werden. Dabei zeigen einzelne intralogistische Maßnahmen wie die Optimierung der Beschickungsreihenfolge der Schmelzöfen ein Einsparpotential von bis zu 20 %.

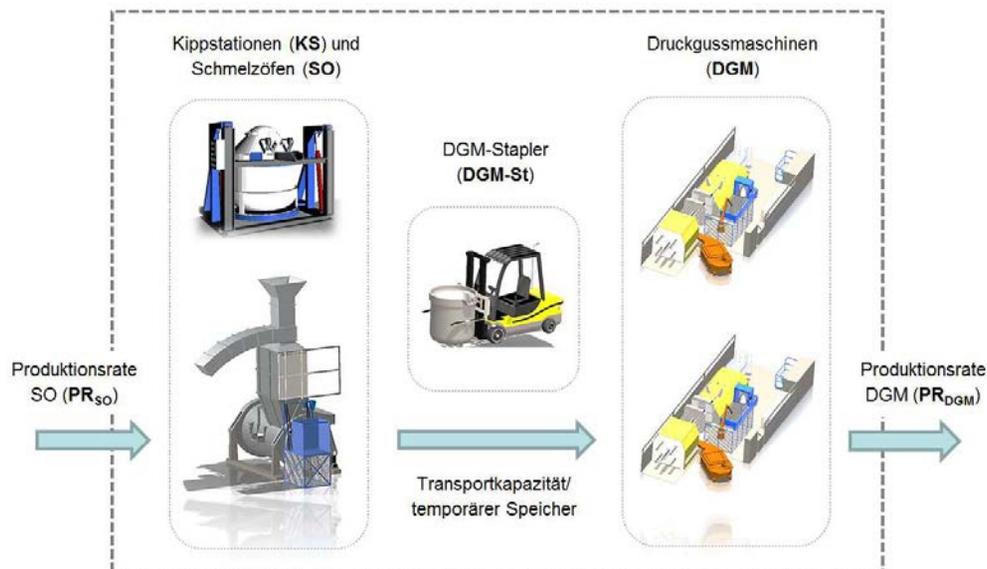


Abb. 24: Innerbetriebliche Lieferkette des Flüssigaluminiums

Tab. 3: Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen

	spez. Energieverbrauch [kWh/t]	OEE [%]	Ausfall durch Aluminiummangel [%]
Keine Maßnahmen	910	85,6	1,66
Reduzierte Flüssigaluminium-Anlieferung	831	80,3	3,40
Materialvorwärmung	828	89,5	0,35
Ofenabschaltung	803	84,5	2,02
Optimierte Beschickung	722	90,6	0,00

Energiekennzahlen

Durch die Analyse der innerbetrieblichen Lieferketten des Flüssigaluminiums im Betrieb eines Kooperationspartners konnte die Kennzahl „Speicherverhältnis“ entwickelt werden, die das Verhältnis des Flüssigaluminiumangebots zum prognostizierten Verbrauch angibt und damit die Versorgungslage charakterisiert (Abb. 25).

BZ _{DGM} \ BZ _{SO}	++	+	0	-	--
++	UL	UL-NL	NL	N-ÜL	ÜL
+	UL-NL	NL	NL-ÜL	ÜL	ÜL
0	NL	NL-ÜL	ÜL	ÜL	ÜL
-	NL-ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL
--	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL

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

Bewertungskriterium (Grenzen)
 Lastfall

Abb. 25: Neu entwickelte Kennzahl „Speicherverhältnis“

Für die Bestimmung der Kennzahl ist die Auswertung von Produktionsdaten und von Füllständen der Flüssigaluminiumspeicher notwendig. Dies gestaltet sich je nach Produktionsbetrieb als sehr schwierig. Aus der Betriebsanalyse von drei Kooperationspartnern unterschiedlicher Größe konnten diesbezüglich drei verschiedene Automatisierungsgrade spezifiziert werden: Während bei einem kleinen mittelständischen Unternehmen (Heuschkel GmbH) keine Sensorik zur Bestimmung der Füllstände vorhanden war, wurden bei einem größeren mittelständischen Unternehmen (Kooperationspartner A: pressmetall Gunzenhausen GmbH) nur die Füllstände der Schmelzöfen erfasst und in eine zentrale Datenbank geschrieben. Den höchsten Automatisierungsgrad besaß ein Zulieferer für die Automobilindustrie (Kooperationspartner B: ZF Gusstechnologie GmbH), der die notwendigen Daten über einen Web Service zur Verfügung stellen konnte.

Pilotprojekte

Das Ziel von in zwei verschiedenen Industriebetrieben durchgeführten Pilotprojekten bestand darin, zum einen die Verfügbarkeit der Daten über die Sensorik, die speicherprogrammierbaren Steuerungen bis zur Speicherung in einer zentralen Datenbank zu untersuchen und zum anderen die Akzeptanz des Betriebspersonals für die angestrebte Lösung zu überprüfen.

Beim Kooperationspartner A, einem größeren mittelständischem Betrieb, wurde im Rahmen eines Pilotprojektes die Software MeltOnline entwickelt, die die wichtigsten online verfügbaren Prozessdaten der Schmelz- und Druckgussmaschinen in prägnanter Form darstellt (Abb. 26). Die aktuell verfügbaren Prozessdaten werden hierfür auf einem Datenbankserver gesammelt. Probleme sind hierbei unstrukturiert erfasste Daten auf den Maschinenrechnern, ein geringer Parameterumfang und eine geringe Aktualisierungsrate der Maschinendaten. Das Tool wurde auf verschiedenen Rechnern im Werk installiert und ermöglicht den Mitarbeitern, sich einen Überblick über den aktuellen Produktionsbetrieb zu verschaffen.

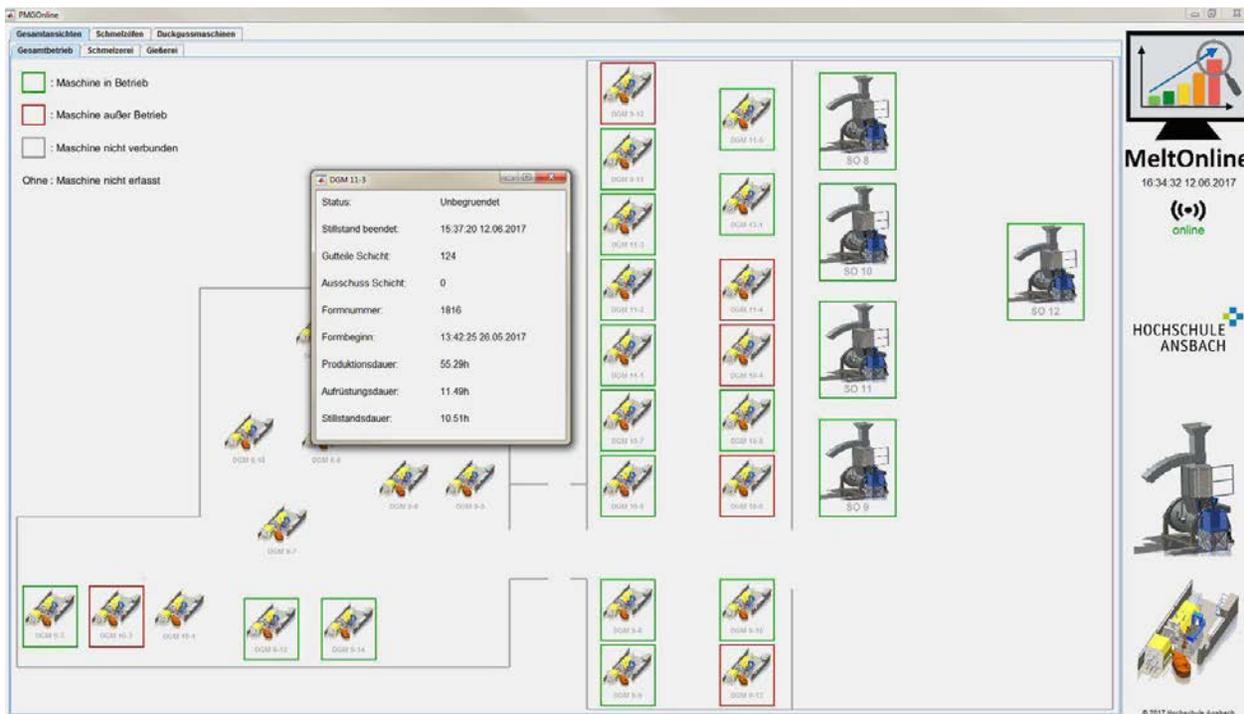


Abb. 26: Gesamtansicht der Online-Anzeige beim Kooperationspartner A

Beim Kooperationspartner B, einem großen Zulieferer für die Automobilindustrie, wird der Flüssigaluminiumbedarf der produzierenden Druckgussmaschinen aktuell mit einer zentralen Anzeigetafel über Ampelfarben (rot = Flüssigaluminiummangel) angezeigt und basierend auf diesen Informationen wird der Transport und die Verteilung des Aluminiums vorgenommen. Mit einer selbstentwickelten Prozessvisualisierung (Abb. 27) konnten die Informationen dezentral auf verschiedenen Rechnern dargestellt werden. Der Zugriff auf die Maschinendaten stellte hier auf Grund der im Vergleich zum Kooperationspartner A stärker ausgebauten Automatisierungsinfrastruktur des Unternehmens kein

größeres Problem dar und die Anbindung konnte über einen Web Service erfolgen. Durch die Entwicklung einer Prozessvisualisierung werden die Füllstände der Druckgussmaschinen digital dargestellt. Die Prozessdaten sind dabei deutlich detaillierter, als die bisher genutzte Anzeigetafel suggeriert. So liefert das aktuelle System zusätzliche Parameter, wie beispielsweise Temperaturdaten und den Betriebszustand sowie genauere Füllstandinformationen, die eine bedarfsgerechtere Versorgung der Druckgussmaschinen ermöglichen.



Abb. 27: Anzeigetafel und Online-Anzeige der Füllstände der Druckgussmaschinen beim Kooperationspartner B

Prozessdaten-Nutzung im Green Factory Bavaria-Projekt E|Melt

Im Green Factory Bavaria-Teilprojekt E|Melt soll ein Demonstrator zum Aufzeigen der Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb entwickelt werden. Das Projekt besitzt bei einem Fördervolumen von 153.500 € eine Laufzeit von 2 Jahren (bis Dezember 2018). Die Grundlage für den angestrebten Demonstrator, der frei konfigurierbar möglichst viele unterschiedliche Betriebsstrukturen abbilden soll, ist eine aufgrund der hybriden Systemarchitektur sehr komplexe Material- und Energieflusssimulation, die die Material- und Energieflüsse in einem Druckgussbetrieb vollständig abbildet. Sowohl zur Modellierung als auch zur Validierung werden Prozessdaten benötigt, die durch die durchgeführten Pilotprojekte erstmals in ausreichendem Umfang und geeigneter Form zur Verfügung stehen. Insbesondere die Entwicklung von dynamischen Prozessmodellen für verschiedene Schmelzöfen wird dadurch stark erleichtert, so dass die Pilotprojekte hier einen sehr wichtigen Input liefern können.

Ausblick

Die Sicherstellung der Termintreue in der Produktion besitzt in den Unternehmen der NE-Schmelz- und Druckgussindustrie die höchste Priorität. Dies zeigen auch die im Zuge der beiden Pilotprojekte durchgeführten intensiven Fachdiskussionen mit den industriellen Kooperationspartnern. Die Ermittlung und Darstellung der Produktions-Kennzahl Gesamtanlageneffektivität (OEE = Overall Equipment Effectiveness) erhöht deutlich die Akzeptanz für die Einführung einer nutzerspezifischen Anzeige von Energiedaten. Daher wird nach einer genauen branchenspezifischen Definition der OEE (betrachtetes Zeitintervall, Taktzeit, Verfügbarkeit und Qualität) eine nutzerspezifische Implementierung in die Online-Anzeige angestrebt. Darüber hinaus soll eine spezifische Darstellung der ungeplanten Stillstände eine beschleunigte Wartung der Anlagen bewirken und so zu einem energieeffizienteren Betrieb führen. Dies kann durch begleitende speziell durchgeführte Materialflusssimulationen belegt werden.

Auf der Basis aktuell verfügbarer Daten soll die Entwicklung von Assistenzsystemen, wie z.B. zur Staplersteuerung, geprüft werden. Die Konzeption eines solchen Systems ist bereits im Green Factory Bavaria-Projekt Smart Melting erfolgt, es fehlt aktuell eine konkrete Realisierung durch eine Anbindung an den realen Betriebsablauf. Durch die Einbindung eines derartigen Assistenzsystems könnte eine verbesserte Strategie zur Flüssigaluminiumdistribution zum Tragen kommen. In Simulationsstudien konnte gezeigt werden, dass dies neben einer gesteigerten Energieeffizienz auch eine Reduzierung der Produktionsstillstände aufgrund von Aluminiummangel zur Folge hat.

Mit einer Anbindung der bereits entwickelten Material- und Energieflusssimulation an die Prozessdatenerfassung könnte ein, in dieser Form noch nicht vorhandenes, branchenspezifisches System zur Prozessprognose entwickelt werden, das kritische Betriebszustände vorhersagt und ein rechtzeitiges Gegensteuern ermöglicht.

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. Der aus 8 Reihenhäusern bestehende Komplex wurde im Dezember 2017 fertiggestellt. 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 erzielt wurde. Es wohnen bereits drei Familien in den hochgedämmten Gebäuden mit innovativer Gebäudeausrüstung. Das energetische Monitoring startet im Januar 2018.

Die Arbeitsgruppe war bei der Einwerbung zusätzlicher Drittmittel besonders erfolgreich. Die Höhe der Drittmittel-Einnahmen betrug im Jahr 2017 insgesamt 1.688.184 €, entsprechend 61,2 % der Gesamtförderung der EFFIZIENZ-Arbeitsgruppe für 5 Jahre. Mit den Einnahmen konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt werden. Die Arbeitsgruppe besteht z.Zt. aus 25 Mitarbeitern zuzüglich den Professoren und den Studierenden, die in den Unterprojekten mitarbeiten.

In der Außendarstellung, der Durchführung von Veranstaltungen, Vorträgen und Kooperationen sowie bei den Publikationen ist die Arbeitsgruppe besonders aktiv. Die TH Nürnberg hat im November 2017 einen besonderen Effekt aus der Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ zum Patent angemeldet. Im Jahr 2018 sind mindestens 2 Promotionen aus derselben Arbeitsgruppe zu erwarten.

Vorträge & Poster 2017

- [1] Allar, C. und Krcmar, W.: Einfluss des Interfaces zwischen polymeren Nanofasern und Silica-Aerogelen auf werkstofftechnische Eigenschaften, Vortrag in Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie, Martin Luther Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 20. Dezember 2017
- [2] Krcmar, W.: „Modellprojekt Herzo Base – Energiespeicherhäuser“, Vortrag anlässlich der Jahreskonferenz des Energie Campus Nürnberg 2017, 13.12.2017, Energie Campus Nürnberg
- [3] Schmidt, S. und Krcmar, W.: Die Wirkungsweise amorpher Kieselsäure in hochwärmedämmendem Putz- und Dünnbettmörtel“, Vortrag anlässlich der EnCN Jahreskonferenz 2017, 13.12.2017, Energie Campus Nürnberg
- [4] Krcmar, W.: „Vorstellung laufender und Vorschläge für künftige F & E-Projekte“, Vortrag im Themenfeld „Gebäudeeffizienz und effiziente Produktionsprozesse“, anlässlich des BayWISS Workshops „Energie“, 30.11.2017/01.12.2017, Fraunhofer-Forschungscampus Waischenfeld
- [5] Raab, B. und Krcmar, W.: Durchführung 2-tägige Fachexkursion mit Studierenden des Masterschwerpunkts „Silikat- und Grobkeramik“ zur Firma Feldhaus Klinker, Bad Laer, 28./29.11.2017
- [6] Krcmar, W., Hesse, N. und Hildebrand, J.: Energieeffiziente Baustoffe für Neubau und Sanierung; Vortrag und Präsentationsstand anlässlich des „Akademischen Mauerwerkstag 2017“ des Ziegelzentrum Süd e.V., Technische Hochschule Nürnberg/Fakultät Architektur, 17.11.2017
- [7] Krcmar, W.: Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen, Poster-Präsentation anlässlich der Verleihung des „European Energy Award“ in Gold an die Stadt Herzogenaurach, bayerische energie agenturen, 06.11.2017, München
- [8] Krcmar, W.: Durchführung „Zieglerseminar“, Innovationszirkel der Ceramix AG Nürnberg, 27.09.2017, Energie Campus Nürnberg

- [9] Wedel, N., Allar, C., Krcmar, W. et al.: Aerogel-Faser-Verbundwerkstoffe, Vortrag anlässlich der Arbeitsgruppensitzung Forschungsprojekt „NanoFIM“ (FKZ 03SF0543B), 25.09.2017, Energie Campus Nürnberg
- [10] Koutrouveli, K. und Kießling, G.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser“; Poster anlässlich der Auftaktveranstaltung zur Klimaschutzwoche Herzogenaurach, 16.09.2017, Herzogenaurach
- [11] Betzold, C. und Krcmar, W.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“; Vortrag und Präsentationsstand anlässlich der Auftaktveranstaltung zur Klimaschutzwoche Herzogenaurach, 16.09.2017, Herzogenaurach
- [12] Krcmar, W.: Präsentationsstand „Smart City Energy Jam“, Stadt Nürnberg, 17./18.07.2017, Energie Campus Nürnberg
- [13] Krcmar, W.: „Recyclat-Ziegel“, Vortrag anlässlich der Arbeitsgruppenbesprechung Forschungsprojekt „TOGRA“ (FKZ NW-1303-0007), Porotonwerk Schlagmann, 30.06.2017, Zeilarn
- [14] Krcmar, W.: „Herzo Base-Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“, Vortrag anlässlich der 11. Konferenz Solarökologische Bausanierung, Solarzentrum Mecklenburg-Vorpommern, Wietow, 27./28.04.2017
- [15] Krcmar, W.: „Building Materials Against Outside Heat“; Präsentation at the Symposium „Recent Advances in Renewable Energy Technologies“; Texas A&M University at Doha; 03.04.2017, Qatar
- [16] Krcmar, W.: Durchführung „Zieglerseminar“, Innovationszirkel der Ceramix AG Nürnberg, 29.03.2017, Energie Campus Nürnberg
- [17] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: NanoFIM – Höchstwärmedämmende Nanofaser-Isolationsmaterialien für energieeffiziente Gebäude, Poster-Dauerausstellung im Energie Campus Nürnberg, März 2017, EnCN
- [18] Schmidt, S., Pöllmann, H. und Krcmar, W.: „Improvement of insulation using modified mortar bed technique“; Poster anlässlich der Tagung „From the mine to the Product“, 13./15.03.2017, Martin Luther Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Geographie, Mineralogie und Geochemie
- [19] Dentel, A. und Krcmar, W.: Teilnahme am Kongress „EnergieEffizienzBauen“ mit Poster-Präsentation „Herzo Base Energiespeicherhäuser – ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“, 30./31.01.2017, Berlin
- [20] C. Betzold. Regelungsstrategien für den optimierten Betrieb von modulierenden Wärmepumpen. Workshop "Energieeffiziente Niedrigenergiegebäude", 13. - 14. Sept., 2017, Freiberg (Sachs), Deutschland
- [21] C. Betzold; F. Bockelmann. Long-term monitoring and smart heat pumps for nZEB. Joint Workshop IEA HPT Annex 49/50 and IEA EBC Annex 67 "Heat pumps for nZEB, retrofit and energy flexibility", 15. Mai, 2017, Rotterdam, Niederlande
- [22] J. Buderus; A. Dentel. Generalization Approach for Models of Thermal Buffer Storages in Predictive Control Strategies. 07. – 09. Aug., 2017, San Francisco, USA
- [23] S. Deitsch. Localization and Mapping for Aerial Infrared Imagery using Sparse Semi-direct Visual Odometry, Pattern Recognition Seminar, Rothenburg ob der Tauber, July 24, 2017
- [24] R. Steckel. Energieeffiziente Antriebe mit Mehrphasenmaschinen. Wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Antriebstechnik und Elektromobilität (WiKE³), 2017
- [25] A. Dietz; S. Wendel. Neuartige Regelungskonzepte. Cluster Mechatronik & Automation, Arbeitstreffen Themengruppe Antriebstechnik 2017.
- [26] S. Wendel. Area-Efficient FPGA Implementation of Finite Control Set MPC. ALM-Symposium, Strobl/St. Wolfgang 2017.
- [27] S. Wendel; A. Dietz. Modellprädiktive Positionsregelung von permanenterregten Synchron-Linearantrieben. Ausstellungsstand auf der Langen Nacht der Wissenschaften Nürnberg - Fürth - Erlangen 2017.
- [28] W. Schlüter. Mehr Energieeffizienz im Schmelzbetrieb: Ergebnisse aus Simulationsstudien. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (BDG) Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss 2017.
- [29] W. Schlüter. Die Virtuelle Leitwarte: Demonstration eines Prozessmanagementsystems für den NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb. Bund Deutscher Gießereiunternehmen (BDG) Fachausschusssitzung Sand- und Kokillenguss 2017.

- [30] W. Schlüter. Prozessoptimierung in der energieintensiven Industrie durch Online-Datenerfassung und –verarbeitung (Industrie 4.0). Innovationsforum Mittelstand. Nachhaltige Energiesysteme - sicher, dezentral, vernetzt. Abschlusskonferenz 2017.
- [31] W. Schlüter; M. Henninger; J. Krieg; J. Schmidt. Die Virtuelle Leitwarte. Ausstellungsstand auf dem 17. Deutschen Druckgusstag 2017.
- [32] W. Schlüter; A. Buswell; J. Krieg; A. Khayatzaeh. Die Virtuelle Leitwarte. Ausstellungsstand auf der Langen Nacht der Wissenschaften Nürnberg - Fürth - Erlangen 2017.
- [33] J. Krieg; W. Schlüter. Online-Energiekennzahlen für Aluminium Schmelz- und Druckgussbetriebe. ENCN-Winterkonferenz 2017.
- [34] A. Buswell; W. Schlüter. E|Melt - Entwicklung eines Demonstrators zum Aufzeigen der Wirksamkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb. 4. GFB Kolloquium 2017.
- [35] J. Krieg; W. Schlüter. Smart Melting: Energiekennzahlen der Nichteisen-Schmelz und Druckgussindustrie. 4. GFB Kolloquium 2017.
- [36] J. Krieg; S. Müller; W. Schlüter. Ein erster Schritt hinzu Industrie 4.0 mit MATLAB - Vernetzung und Verwendung von Maschinendaten in der Schmelz- und Druckgussindustrie. MATLAB Expo 2017.
- [37] W. Schlüter. Industrielle Energieeffizienz im Projekt EFFIZIENZ. ENCN-Sommerkonferenz 2017.

Veröffentlichungen 2017

- [1] Krcmar, W.: „Wirbelschichtreaktor – Entwicklung einer Pilotanlage zur thermischen Behandlung organischer, metallischer und keramischer Mikrobauteile in der Wirbelschicht“, Berichte zur Vorlauftforschung, Schriftenreihe der TH Nürnberg, Heft 23 (2017)
- [2] Geber, A., Döbbelin, M. und Krcmar, W.: „Entwicklung eines gasbefeuerten Wirbelschicht-Sinterofens für keramische Elektronikbauteile kleinster Abmessungen“; Abschlussbericht STAEDTLER-Stiftung, 20.04.2017, Nürnberg
- [3] Wedel, N., Allar, C. und Krcmar, W.: Zwischenbericht Forschungsprojekt „NanoFIM“, Projektträger Jülich, FKZ 03SF0543B), 24. 04.2017
- [4] Wedel, N. und Krcmar, W.: „Neuartige Trocknungsverfahren von keramischen Formlingen: Entwicklung eines neuen energieeffizienten Verfahrens zur Feuchteableitung pressfeuchter Ziegelrohlinge“, ZIM-Kooperationsprojekt (BMWi), FKZ: KF 2151802SU4, Abschlussbericht, 11.04.2017
- [5] M. Eberl, H. Sinnesbichler, G. Grün. Technische Mock-Ups zur Absicherung integraler Fassaden-Konzepte. FASSADE - Technik und Architektur, 26 (2), S. 18-21, 2017
- [6] M. Eberl, H. Sinnesbichler, G. Grün. Technisch-funktionale Modelltests zur Absicherung integraler Fassadenkonzepte. nachhaltige technologien 2/2017, S. 17-19.
- [7] F. Bockelmann; C. Betzold. Load management of nZEB - an important element for future energy supply and implementation of renewable energy sources. In: Heat Pumping Technologies Magazine, 35 (3), S. 22 – 26. ISSN 2002-018X
- [8] J. Buderus; A. Dentel. Regelungsstrategien für multimodale Energieerzeuger auf dem Prüfstand. Ingenieurspiegel 1 (2017). S. 11 – 12
- [9] M. Dalsass; S. Deitsch; D. Moerman; F. Gallwitz; C. J. Brabec. Algorithmus zur IR-Panoramabilderstellung aus IR-Luftaufnahmen von PV-Freiflächenanlagen. In: 32. Symposium Photovoltaische Solarenergie. (Kloster Banz, Mar. 8–10, 2017). Bad Staffelstein, Germany, Mar. 2017.
- [10] S. Wendel; A. Dietz; R. Kennel. Model Predictive Position Control for Permanent Magnet Synchronous Linear Motors. In: 11th ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems (IKMT). Sep. 2017.

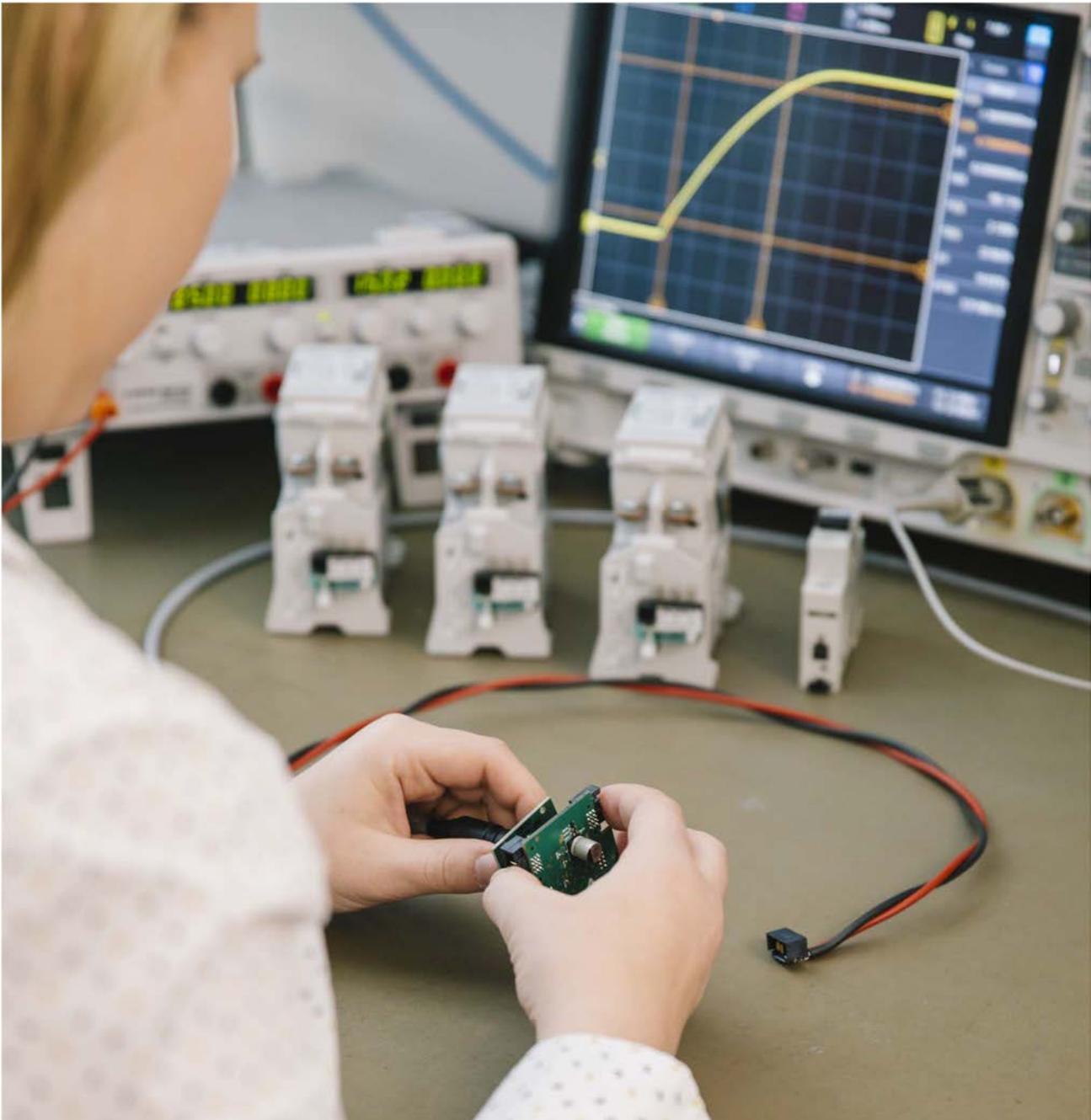
- [11] S. Wendel; A. Dietz; R. Kennel. FPGA Based Finite-Set Model Predictive Current Control for Small PMSM Drives With Efficient Resource Streaming. In: 4th Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). Sep. 2017.
- [12] S. Wendel; A. Dietz; R. Kennel. Area-Efficient FPGA Implementation of Finite Control Set Model Predictive Current Control. In: 3rd IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Dez. 2017.
- [13] M. Hoerner; S. Wendel; A. Dietz. Automated parameter identification of fractional horse power permanent magnet synchronous motors. In: 11th ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems (IKMT). Sep. 2017.
- [14] W. Schlüter; A. Buswell; M. Henninger; J. Schmidt. Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: Sigrid Wenzel & Tim Peters (Hg.): 17. Fachtagung: Simulation in Produktion und Logistik 2017. 17.
- [15] W. Schlüter; J. Schmidt; M. Henninger; J. Krieg. Key figures for production control in non-ferrous melting and die-casting plants based on the assessment of the operating state. In: Jörg Franke, Sven Kreitlein, Gunther Reinhart, Christian Gebbe, Rolf Steinhilper und Johannes Böhner (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production III. 4th Green Factory Colloquium: Trans Tech Publications (Applied Mechanics and Materials, 871), 2017.
- [16] W. Schlüter; J. Schmidt; K. Zacharias; S. Müller; J. Krieg; M. Henninger. Energieeffiziente Produktion in NE-Schmelz und Druckgießbetrieben. Forschung am Kompetenzzentrum für industrielle Energieeffizienz (KiEff) der Hochschule Ansbach. In: *Giesserei* 2017 (104).
- [17] M. Henninger; W. Schlüter; D. Jeckle; J. Schmidt. Smart Melting: Steigerung der Energieeffizienz in der Schmelzerei von Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetrieben. In: *Giesserei* 2017 (104) (2)
- [18] J. Krieg; W. Schlüter. Softwarebasierte Analyse von Simulationsdaten durch automatisierte Berechnung von Kennzahlen. In: Walter Commerell und Thorsten Pawletta (Hg.): ASIM-Treffen STS/GMMS 2017. Workshop der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMMS. Ulm, 9. und 10. März. 1 Band.
- [19] M. Henninger; W. Schlüter: Entwicklung eines räumlich aufgelösten dynamischen Prozesssimulationsmodells eines Aluminiumschachtschmelzofens. In: Walter Commerell und Thorsten Pawletta (Hg.): ASIM-Treffen STS/GMMS 2017. Workshop der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMMS. Ulm, 9. und 10. März. 1 Band.
- [20] M. Henninger; W. Schlüter; D. Jeckle; J. Schmidt. Simulation Based Studies of Energy Saving Measures in the Aluminum Tool and Die Casting Industry. In: Jörg Franke und Sven Kreitlein (Hg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production Vol. II: Trans Tech Publications (Applied Mechanics and Materials, 856), 2017.

Patente 2017

- [1] S. Schmidt und 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

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 Elektrische Energietechnik

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik der FAU Fraunhofer IISB	n.a.

Projektbericht 2017

Der Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik (LEE) wurde mit der Berufung von Prof. März zum 1. September 2016 neu gegründet. Er ist der erste aus dem Energie Campus Nürnberg entstandene Lehrstuhl des Departments Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mit der Leistungselektronik steht DIE Schlüsseltechnologie für eine intelligente und effiziente Erzeugung, Verteilung und Nutzung elektrischer Energie im Fokus des Lehrstuhls. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Schaltungs- und Systemtechnik für Leistungselektronik im Nieder- und Mittelspannungsbereich. Die Forschungsthemen reichen von neuartigen Integrationstechnologien über das Erforschen der Potentiale moderner Leistungshalbleiterbauelemente bis hin zu Fragen der Lebensdauer und Verfügbarkeit, der Netzstabilität und Schutztechnik - hier speziell für hocheffiziente Gleichspannungsnetze. Daneben fallen der Leistungselektronik im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung zunehmend auch Aufgabe der Anlagen-, Netz- und Prozessüberwachung zu. Auch hierzu werden innovative Lösungsansätze wissenschaftlich untersucht.

Der Lehrstuhl verfügt zum Stand Ende 2017 am Energie Campus Nürnberg über zwei Laborhallen mit zusammen etwa 200 qm sowie über drei Büroräume mit je 40 qm. Die Bereitstellung der eigentlichen Lehrstuhlräumlichkeiten am EnCN liegt aufgrund von Verzögerungen beim Mietvertrag etwa ein Jahr hinter dem ursprünglichen Zeitplan zurück. Der personelle Aufbau in 2017 erfolgte daher mit „leicht angezogener Handbremse“ und liegt aktuell etwas hinter dem ursprünglichen Plan.

Der Aufbau der Forschungsinfrastruktur in den beiden Laborhallen liegt dagegen im Zeitplan. Das „Testfeld für DC-Netze“ ist aktuell in der Inbetriebnahme. Mit diesem sehr flexibel konfigurierbaren Testfeld für Spannungen bis 1.500 Volt und Leistungen bis etwa 100 Kilowatt werden umfassende Untersuchungen zur Netzstabilität, zum Fehlverhalten und zum Zusammenspiel der verschiedenen leistungselektronischen Wandler in einem Gleichspannungsnetz ermöglicht. Simuliert werden können die Einspeisung aus einer PV-Anlage, die Ankopplung verschiedener Batteriespeicher, unterschiedliche Schutz- und Erdungskonzepte sowie vielfältige Fehlerszenarien. Eine Reihe von Industriepartnern hat bereits großes Interesse an dieser Forschungsinfrastruktur bekundet.

Daneben ist auch das geplante Testfeld für Mittelspannung in der Inbetriebnahme. Hier werden – unter den erforderlichen besonderen Schutzmaßnahmen – Untersuchungen an Leistungselektronik bis zu Spannungen von etwa 10kV möglich sein. Ein erstes Industrieprojekt dazu ist die Untersuchung neuartiger Kommunikationskonzepte innerhalb von „Modularen Multilevel Umrichtern“ mit dem Ziel einer deutlichen Reduzierung des Hardware-Aufwands.

Eine besonders enge Zusammenarbeit des LEE innerhalb des EnCN besteht mit dem Fraunhofer-IISB. Diese schließt auch die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur ein. Darüber hinaus gibt es gemeinsame Projekte mit der TH-Nürnberg.

In 2017 konnte das EU-Projekt CONNECT (Horizon 2020) gestartet werden, gemeinsam mit der RWTH Aachen, der Infineon AG und weiteren Partnern. Aufgabe des LEE in diesem Projekt ist zum einen die Erforschung neuartiger DC/DC-Wandler mit sehr hoher Energieeffizienz zum anderen die Untersuchung von neuartigen, in Leistungselektronik integrierbaren Schutz- und Überwachungsfunktionen für Batteriesysteme.

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 im Fahrzeug und Antriebsstrang
- Leistungselektronik für dezentrale Energieversorgung – Gleichspannungsnetze
- Thermisches Management in der Leistungselektronik

Diese richten sich in erster Linie an Studierende der Studienrichtungen Energietechnik, Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik und Mechatronik.

In 2017 wurden 34 studentische Abschlussarbeiten betreut und 31 laufende Promotionen. Eines der Highlights war zweifellos die Auszeichnung der Masterarbeit von Frau Verena Müller über Betriebsstrategien bei der Formation von Lithium-Ionen Zellen mit dem 2. Preis in der Kategorie Diplom- und Masterarbeiten im Rahmen des bundesweiten Wettbewerbs DRIVE-E (www.drive-e.org) des BMBF.

Im ersten Halbjahr 2018 hoffen wir, die Lehrstuhlräumlichkeiten (Büros, Elektroniklabor, Studentenlabor) beziehen zu können. Darüber hinaus ist in 2018 mit einem größeren EU-Projekt der Einstieg in den Bereich der Luftfahrt elektronik, und damit in das Forschungsgebiet der Leistungselektronik für besonders harte Umgebungsbedingungen, geplant.



Abbildung 1: Verleihung der DRIVE-E-Studienpreise 2017 im Porsche Museum, 2. Preis Kategorie Diplom- und Masterarbeiten (von links nach rechts) Prof. Dr. Alexander Kurz Vorstand Fraunhofer-Gesellschaft, Preisträgerin Verena Müller (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg) und MinR Hermann Riehl Referatsleiter Elektronik, autonomes elektrisches Fahren des BMBF.

Vorträge & Poster 2017

- [1] M. März. Einführung in die verschiedenen Stromspeichertechnologien und deren Aufbau. Workshop Stromspeicher der Elektrofachbetriebe der Oberfränkischen Innungen. Waischenfeld, 19.07.17.
- [2] M. März. Elektromobilität - Tendenzen und Erfordernisse aus der Sicht der Wissenschaft. 20. Sitzung Forum Verkehr und Planung, Nürnberg, 4. Mai 2017
- [3] M. März. Ladetechnologien und Netzintegration. Tagung Ladeverbund Franken+: „Zukunft der Elektromobilität gestalten“, Nürnberg, 28. Nov. 2017

Veröffentlichungen 2017

- [4] V. Müller, R. Kaiser, S. Poller, D. Sauerteig, R. Schwarz, M. Wenger, V. Lorentz, M. März. Introduction and application of formation methods based on serial-connected lithium-ion battery cells, Elsevier Journal of Energy Storage, Sept. 2017
- [5] M. Maerz, B. Wunder, L. Ott. LVDC-Netze – Herausforderungen und Perspektiven. 7. ETG-Fachtagung Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, Bad Nauheim, April 2017
- [6] O. Kreuzer, M. Billmann, M. März. A passively cooled 15 kW, 800 V DCDC-converter with a peak efficiency of 99.7 %, IEEE AFRICON, Kapstadt, Südafrika, 18-20. Sept., 2017
- [7] J. Kaiser, K. Gosses, L. Ott, Y. Han, B. Wunder, M. März, R. Weiss, Grid Behavior under Fault Situations in ± 380 VDC Distribution Systems, IEEE ICDCM, Nürnberg, 27.-29. June 2017
- [8] F. Fersterra, K. Gosses, M. Schulz, B. Wunder, M. März. A Bidirectional Approach for Segregated DC Microgrids, IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Nürnberg, 2017
- [9] S. Matlok, B. Eckardt, B. Seliger, M. Maerz. Digital Control of Hard Switched Converters by Phase Modulated Pulse Width Modulation PMPWM, PCIM Europe 2017, Nuremberg, 16-18 May 2017
- [10] J. Körner, S. Matlok, M. Hofmann, M. März. Parasitic Inductance Analysis of a Fast Switching 100 kW Full-SiC Inverter, PCIM Europe, Nürnberg, 16.-18. May 2017
- [11] J. Kaiser, K. Gosses, L. Ott, Y. Han, B. Wunder, M. März, F. Schork, K. Bühler, T. Böhm. Safety Considerations for the Operation of Bipolar DC-Grids, IEEE INTELEC, Gold Coast, 22.-26. Oct. 2017
- [12] B. Wunder, L. Ott, J. Kaiser, K. Gosses, M. Schulz, F. Fersterra, Y. Han, M. Lavery, M. März. Droop Controlled Cognitive Power Electronics for DC Microgrids, IEEE INTELEC, Gold Coast, 22.-26. Oct. 2017
- [13] A. Endruschat, T. Heckel, H. Gerstner, C. Joffe, B. Eckardt, M. März. Application-Related Characterization and Theoretical Potential of Wide-Bandgap Devices, IEEE WiPDA, Albuquerque, 30. Oct. – 1. Nov.
- [14] H. Gerstner, T. Heckel, A. Endruschat, B. Eckardt, M. März: SiC Power Module Loss Reduction by PWM Gate Drive Patterns and Impedance-Optimized Gate Drive Voltages, IEEE WiPDA, Albuquerque, 30. Oct. – 1. Nov.
- [15] Y. Han, J. Kaiser, L. Ott, M. Schulz, F. Fersterra, K. Gosses, B. Wunder, M. März. High Efficiency Control Method for Non-Isolated Three-Port DC/DC converter, PCIM Asia, Shanghai, 27.-29. June 2017
- [16] B. Ruccius, B. Preller, B. Wagner, M. Maerz: An Advanced Control Concept for Modular Multilevel Converter using Capacitor Voltage Estimation. 3rd Annual Southern Hemisphere Power Electronics Conference, Puerto Varas, Chile, Dec. 2017
- [17] A. Pai, T. Reiter, O. Vodyakho, I. Yoo, M. Maerz. A Calorimetric Method for Measuring Power Losses in Power Semiconductor Modules. EPE'17 ECCE EUROPE, Warsaw, Poland, Sept. 2017, DOI 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099017

Patente 2017

- [18] M. Angerer; M. März; R. Schwanninger. Schaltung zur Filterung von Gleichtaktströmen.

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

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Prof. Dr. Veronika Grimm, FAU - LS für Wirtschaftstheorie (Koordination) Prof. Dr. Roland Ismer, FAU - LS für Steuerrecht und Öffentliches Recht Prof. Dr. Frauke Liers, FAU - LS für Wirtschaftsmathematik Prof. Dr. Alexander Martin, FAU - LS für Wirtschaftsmathematik PD Dr. Lars Schewe, FAU - LS für Wirtschaftsmathematik Prof. Dr. Martin Schmidt, FAU - LS für Wirtschaftsmathematik Prof. Dr. Gregor Zöttl, FAU - Professur für Volkswirtschaftslehre	TPJ1: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, PD Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Prof. Dr. Gregor Zöttl TPJ2: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, PD Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Prof. Dr. Gregor Zöttl TPJ3: Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Roland Ismer, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, PD Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Projektbericht 2017

Im Projekt „Energiemarktdesign“ des EnCN² befasst sich ein Forscherteam aus Ökonomen, Mathematikern und Juristen mit den wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Transformation des Energiesystems. Ziel ist es, die Methoden der Energiemarktmodellierung und die notwendigen mathematischen Algorithmen weiterzuentwickeln 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 regulierten Netzausbau und privatwirtschaftliche Investitionen sowie der Identifikation von Rahmenbedingungen auf Verteilnetzebene, die Geschäftsmodelle regionaler Stakeholder als Flexibilitätsoptionen nutzbar machen. Zur Adressierung dieser komplexen ökonomischen Fragestellungen werden im Projekt „Energiemarktdesign“ auch die mathematischen Techniken erarbeitet, um die Lösbarkeit der betrachteten Modelle zu gewährleisten. Eine weitere zentrale Fragestellung ergibt sich aus der wachsenden Bedeutung der Sektorkopplung. In dem Projekt sollen hierzu mathematische Verfahren zur Bewertung des europäischen Gasmarktdesigns zur Anwendung kommen, die im Sonderforschungsbereich Transregio (SFB TRR) 154 zur mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung von Gasnetzwerken von den Projektpartnern und anderen Forschern entwickelt werden. Auf Basis dieser grundlegenden Resultate des TRR 154 können dann 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 Investitionsentscheidungen untersuchen zu können.

Im Rahmen des EnCN², der im Projekt Energiemarktdesign mit der Kick-off Veranstaltung am 05.05.2017 erfolgreich gestartet ist, wurden zu diesen Forschungsfragen im Jahr 2017 mehr als 20 wissenschaftliche Arbeiten verfasst, die zum Teil bereits in hochrangigen internationalen Zeitschriften publiziert wurden. Ein weiteres Highlight war die Veröffentlichung eines Gutachtens im Auftrag der Monopolkommission zur Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017. Außerdem wurden mehrere Nachwuchswissenschaftler für ihre exzellente Forschungsarbeit ausgezeichnet. Die öffentliche Wahrnehmung und wissenschaftliche Vernetzung des EnCN profitierte wesentlich von der aktiven Teilnahme an internationalen Konferenzen mit ca. 50 Vorträgen, sowie von der Durchführung von internationalen und nationalen Workshops und Seminaren in Nürnberg. Hervorzuheben ist hierbei die bereits dritte Auflage des Nürnberg-München-Berlin Energy Workshops und die umfangreiche Präsenz bei der Langen Nacht der Wissenschaften. 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

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

<http://tinyurl.com/gmeo8hg>

für Bachelor- und Masterstudenten und ein Seminar in Kooperation mit der N-ERGIE AG boten den Studenten verschiedener Studienrichtungen ein umfangreiches Lehrangebot zu verschiedenen Herausforderungen in der Energiewirtschaft.



Abbildung 1: Das Team Energiemarktdesign am Energie Campus Nürnberg

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 in Gleichgewichtsmodellen gemeinsam analysiert werden. Dabei wird untersucht inwieweit sich alternative Rahmenbedingungen, die im Kontext der Energiewende diskutiert werden, auf Investitionen auswirken 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., 2016a [11]) beigetragen und wurde im Jahr 2017 mit mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu theoretischen (Grimm et al., 2017b [6]; Krebs, Schewe und Schmidt, 2017 [21]; Krebs und Schmidt, 2017 [22]) und regulatorischen Forschungsfragen (Grimm et al., 2017a [5]) erfolgreich fortgesetzt. Neben der grundlegenden Weiterentwicklung des Strommarktmodells sowie der zugehörigen Lösungsverfahren haben insbesondere die Gutachten für N-ERGIE AG (Grimm et al., 2016b) und für die Monopolkommission (Grimm, Zöttl und Sölch, 2017) eine sehr breite und positive öffentliche Resonanz erfahren. Außerdem wurde die Kooperation mit den Ingenieurwissenschaften aus dem Projekt Speicher B am EnCN erfolgreich gestartet.

1.2 Anwendungen

Bei der Weiterentwicklung und Analyse des Strommarktmodells wurden im Jahr 2017 diverse Fortschritte erzielt. Krebs, Schewe und Schmidt (2017) [21] und Krebs und Schmidt (2017) [22] bewiesen grundlegende Aussagen zur Eindeutigkeit von Gleichgewichten in physikalischen Netzwerken mit und ohne Transportkosten. Für ihre Arbeit zu diesem Thema erhielt Vanessa Krebs 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., 2017c [7]). Außerdem wird in einer weiteren Arbeit ein mathematischer 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.

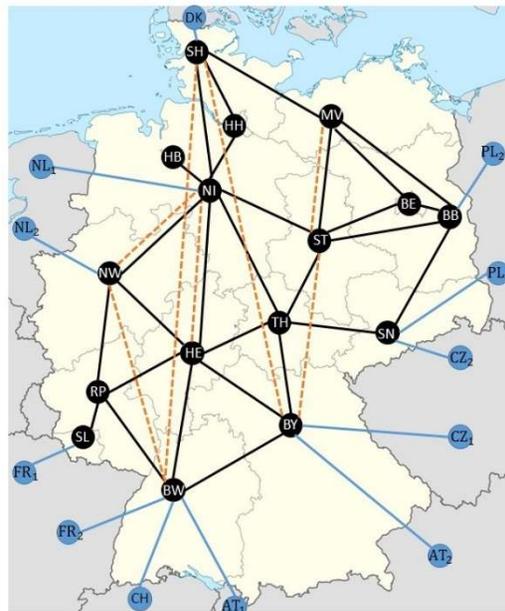


Abbildung 2: Räumliche Betrachtung von Deutschland und den Nachbarstaaten in der Modellierung. Aus: Grimm, Zöttl und Sölch (2017) „Regionale Preiskomponenten im Strommarkt“ – Gutachten für die Monopolkommission.

Neben der Weiterentwicklung des Strommarktmodells wurden auch im Jahr 2017 aktuelle Fragen der energiepolitischen Diskussion in Deutschland im Detail beleuchtet. Eine sehr positive öffentliche Resonanz hat hierbei das Gutachten zu „Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung“ für die Monopolkommission zur Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017 erfahren. Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Gregor Zöttl und Christian Sölch nutzten dabei das am EnCN entwickelte Strommarktmodell, um die langfristigen Auswirkungen der Rahmenbedingungen am Strommarkt auf Investitions- und Produktionsanreize in Netz- und Erzeugungskapazitäten zu bewerten. Im Fokus standen dabei verschiedene Szenarien für den regionalen Zubau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien (Abbildung 3). Die Studie konnte zeigen, dass ein dezentraler und lastnaher Ausbau von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten zu mehr Kosteneffizienz und weniger Netzausbau führt als der aktuell im Netzentwicklungsplan avisierte regionale Ausbaupfad.

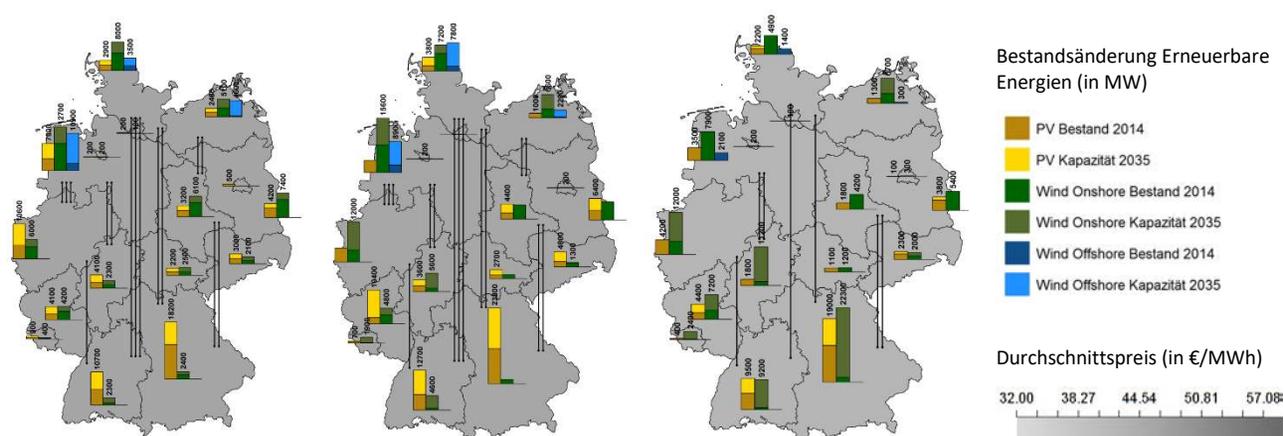


Abbildung 3: Regionale EE-Verteilung und optimaler Netzausbau für verschiedene Ausbauszenarien (im NEP avisierte Ausbau (MG_{NEP}), optimaler Ausbau bei deutschlandweit einheitlicher EE-Vergütung (MG_{UNIV}) und systemoptimaler Ausbau (MG_{OPT1})). Aus: Grimm, Zöttl und Sölch (2017) „Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung“ – Gutachten für die Monopolkommission.

Weitere anwendungsorientierte Forschungsarbeiten zum deutschen Strommarkt beschäftigen sich aktuell (i) mit der modellbasierten Optimierung von endogenen Preiszonen für den deutschen Markt, (ii) mit der Rolle flexibler industrieller Verbraucher (Ambrosius et al., 2018 [1]), und (iii) mit regionalen Investitionsanreizen, z. B. Preiszonen und G-Komponente, sowie kosten- und marktbasierendem Redispatch als Steuerungsinstrumente für Investitionen in Erzeugungskapazität (Grimm et al., 2018a/b [13-14]).

Die Sichtbarkeit der Forschergruppe konnte Anfang 2017 im deutschsprachigen Raum durch ein Expertengespräch auf der Handelsblathtagung Energiewirtschaft 2017 (Prof. Dr. Veronika Grimm) sowie einen Überblicksartikel zur Strommarktmodellierung in der Zeitschrift „Perspektiven der Wirtschaftspolitik“ wesentlich gesteigert werden. Darin werden Herausforderungen und Lösungen in der Modellierung von Investitionsanreizen im Strommarkt erläutert, wobei sich die Publikation Grimm et al. (2017a) [5] insbesondere an Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft richtet. Die Teilnahme an Expertenveranstaltungen in Nürnberg und in der Region ermöglichte zudem einen Austausch mit lokalen Stakeholdern zu Fragen von Netzausbau und Dezentralität in der Energiewende. Inhaltlich diskutiert wurden insbesondere die Ergebnisse der beiden abgeschlossenen Gutachten für die N-ERGIE AG (Grimm et al., 2016b) und für die Monopolkommission (Grimm, Zöttl und Sölch, 2017).

Verschiedene Aktivitäten wurden im Rahmen von Drittmittelprojekten umgesetzt sowie in Kooperation mit externen Partnern durchgeführt. Neben den Gutachten für die N-ERGIE AG und die Monopolkommission ist hier ein im Jahr 2017 abgeschlossenes Projekt zu flexiblen Industriellen Verbrauchern erwähnenswert. Im Rahmen des Marie-Curie Innovative Training Network MINOA (gefördert von der EU, Start 1.1.2018) soll im Doktorandenprojekt der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg die Fragestellung der endogenen Bestimmung von Preiszonen unter unsicherer Datenlage studiert werden. Es sollen neue Methoden zur robusten Absicherung gegenüber unsicheren Zukunftsprognosen entwickelt und implementiert werden.

In den kommenden Jahren werden die aktuell laufenden Aktivitäten fortgeführt und weiterentwickelt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung der Methoden zur endogenen Zonierung auf den deutschen Strommarkt sowie auf der genauen Abbildung von Nachbarländern sowie von endogenen Investitionen in erneuerbare Erzeugungskapazitäten in den Strommarktmodellen. Die Kooperation mit dem EnCN-Projekt Speicher B soll aufgebaut, eine Kooperation mit EET initiiert werden.

1.3 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, 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 „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken“ aufgebaut. In Kooperation dieser beiden Forschungsprojekte wurde im Jahr 2017 die mathematische Beschreibung eines mehrstufigen Gasmarktproblems in Grimm et al. (2017e) [16] erarbeitet, das den formalen Rahmen für die zukünftige Analyse von Entry-Exit-Gasmärkten schafft. 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 für eines der beiden deutschen Marktgebiete bereits ein Modelldatensatz erstellt, der historische Marktdaten und eine vereinfachte Darstellung des Netzes, der Verdichter und der Übergabepunkte zu Nachbarzonen und Endverbrauchern beinhaltet.

Außerdem werden Verfahren, die optimale Ausbauentscheidungen für sogenannte potentialgetriebene Transportnetze, zu denen auch Gastransportnetzwerke zählen, am EnCN entwickelt.

2.2 Anwendungen

Grimm et al. (2017e) [16] 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 4 dargestellt, ist dabei zwischen der physikalischen Systembetrachtung der Gasnetzbetreiber (links) und der Interaktion auf dem Gasmarkt (rechts) zu unterscheiden. Gasnetzbetreiber bestimmen über die technischen Kapazitäten und die Buchungspreise (Stufe 1) sowie den kostenoptimalen Betrieb des Gastransports (Stufe 4), während die Marktakteure durch Buchungen von Kapazitäten (Stufe 2) und Nominierungen (Stufe 3) am Gasmarkt handeln. Die Arbeiten in diesem Forschungsschwerpunkt betrachten aufbauend auf dieser Grundlage realitätsnahe Kalibrierungen für das deutsche System und liefern damit Abschätzungen für die konkreten Ineffizienzen des Entry-Exit-Systems. Hierbei kann vielfach auf die grundlegenden Ergebnisse des SFB TRR 154 zurückgegriffen werden (Gugat et al., 2016 [8]; Geißler et al., 2017a/b [3-4]; Groß et al., 2017 [17]; Gugat et al., 2017 [18]; Hante et al., 2017 [9]; Hante und Schmidt, 2017 [19]; Hübner, Schmidt und Steinbach, 2017 [20]; Leugering et al., 2017 [23], Mehrmann, Schmidt und Stolwijk, 2017 [24]; Schewe und Schmidt, 2016 [25]; Schmidt, Sirvent und Wollner, 2017 [26]; Schmidt et al., 2017 [10]).

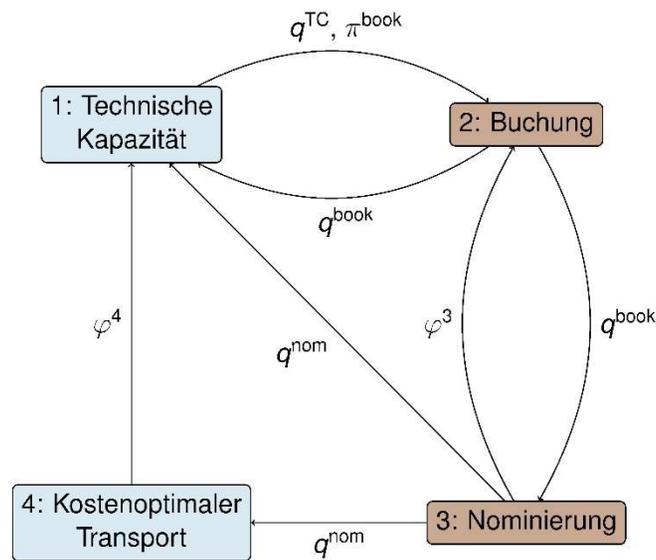


Abbildung 4: Abhängigkeiten in dem mehrstufigen Modell des Europäischen Entry-Exit Systems. Aus: Grimm et al. (2017e) [16].

Ökonomische Analysen zu europäischen Gasmärkten erfordern für die Abbildung bestehender Marktregeln die Modellierung des Entry-Exit Systems. Dabei werden alle physikalischen Randbedingungen auf Handelskapazitäten an marktrelevanten Punkten reduziert. Dies sind innerhalb einer Zone die grenz- und zonenüberschreitenden Netzpunkte, sowie Punkte mit Erdgasspeichern oder Gasproduktion (Abbildung 5). 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 wurden. Im nächsten Schritt können die Marktergebnisse des historischen Entry-Exit Gashandels mit einem Wohlfahrtsoptimum unter Berücksichtigung der physikalischen Flussbedingungen verglichen werden.

Wie im Strommarkt und dem zugrundeliegenden Transportnetz spielt auch der Leitungsausbau in Gastransportnetzen eine wichtige Rolle. In diesem Forschungsschwerpunkt wird daher an der Bestimmung von optimalem Netzausbau gearbeitet – insbesondere unter Berücksichtigung der Modellierung des Gasflusses mithilfe potentialgetriebener Flussmodelle sowie unter Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Ein- und Ausspeisedaten. Die resultierenden Probleme sind mathematisch sehr herausfordernd. Eine Publikation zu diesem Thema befindet sich gerade in der Vorbereitung.

Im kommenden Jahr soll die Datensammlung und die Datenbereitstellung weiter vorangetrieben werden. Im Rahmen der Kooperation zwischen TRR 154 und dem EnCN werden Datenbestände 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. Der TRR 154 befindet sich derzeit in der Begutachtung für die zweite Förderphase, in der Marktthemen eine größere Rolle spielen sollen. Die Begehung findet Ende Januar 2018 statt. Ein enger Bezug soll auch zu dem BMBF-Projekt EiFer (Prof. Dr. Schmidt und externe Partner) hergestellt werden, das zum 1.1.2018 startet und sich mit Fernwärmenetzen beschäftigen wird.

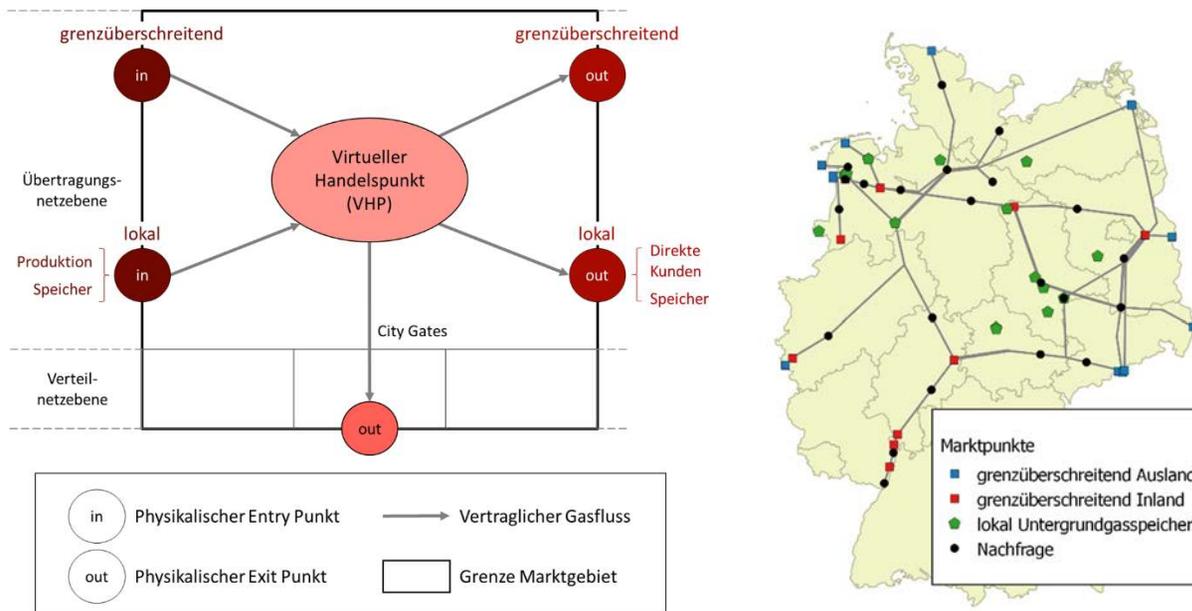


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung des Entry-Exit Systems und GASPOOL Marktregion mit wichtigen Pipelines sowie Markt- und Nachfragepunkten. Eigene Darstellung.

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 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 Arbeiten 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 (vgl. Grimm, Kretschmer und Mehl, 2018 [12]). Haußner und Ismer (2018) [2] betrachten die rechtlichen Rahmenbedingungen des Speicherbetriebs mit Blick auf die Entflechtung auf Verteilnetzebene. In laufenden Arbeiten mit stärker mathematischem Fokus werden diese verschiedenen Perspektiven ergänzt, indem optimale Tarifstrukturen auf der Endverbraucherebene in Smart Grids mithilfe mehrstufiger Optimierungsprobleme bestimmt werden.

3.2 Anwendungen

Im Jahr 2017 konnten verschiedene Aktivitäten abgeschlossen werden, auf denen die weitere Zusammenarbeit aufbaut. Im Projekt „Smart Grid Solar“ wurde das Zusammenspiel von Erzeugern, Speicherbetreibern, Verteilnetzbetreibern und Verbrauchern bei der Planung von Smart Grids analysiert und untersucht, welche Marktregeln zusammen mit den wirtschaftspolitischen Steuerungsmechanismen (wie z. B. den im EEG getroffenen Regelungen) zu den richtigen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure am Markt führen. Als Kernstück der ökonomischen Analyse im Projekt „Smart Grid Solar“ wurde eine quantitative Analyse der Anreize zur Umsetzung eines Smart Grid Systems durch die relevanten Marktteilnehmer unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen durchgeführt. Eine Anwendung der entwickelten Modelle auf das Verteilnetz am Versuchsstandort Epplas in Oberfranken zeigt dort ein Effizienzsteigerungspotenzial von insgesamt 10% der Gesamtsystemkosten pro Jahr, welches durch verschiedene Marktdesigns mehr oder weniger genutzt werden kann.

In einer komplementären juristischen Studie zum Speicherbetrieb und zur Entflechtung auf Verteilernetzebene wurde das derzeitige Entflechtungsregime sowie die geplanten Änderungen der Europäischen Kommission im Winterpaket auf mögliche Einsatzbereiche des Speichers auf Verteilernetzebene untersucht (Abbildung 6), um daraus mögliche alternative Vertrags- und Ausschreibungsszenarien für den Speicherbetrieb im Verteilernetz abzuleiten (Haußner und Ismer, 2018 [2]). Diese könnten dem Verteilnetzbetreiber ermöglichen, in den rein gewinnmaximierenden Speicherbetrieb von privaten Betreibern einzugreifen, um damit Kosten beim Netzausbau und der Netzbewirtschaftung zu reduzieren. Zur Quantifizierung der Einsparungen in den jeweiligen Szenarien wird in einem laufenden Projekt zwischen Ökonomen und Juristen ein zweistufiges Optimierungsmodell entwickelt, das es erlaubt, die möglichen Effizienzgewinne zu identifizieren.



Abbildung 6: Speicher im Verteilernetz: Rechtliche Probleme und Lösungsansätze. Eigene Darstellung.

In einer Studie zur Investitionsbereitschaft in Kleinspeicheranlagen im Rahmen des Kooperationsprojekts „SWARM“ (initiiert und gefördert durch die N-ERGIE AG) wurde auf Basis umfangreicher und selbst erhobener Umfragedaten von Haushalten mit Solaranlagen die Investitionsbereitschaft in Kleinspeicheranlagen untersucht. Mithilfe korrelationsbasierter Clusteralgorithmen konnten dabei vier Kundentypen mit unterschiedlichen Anspruchshaltungen identifiziert werden: finanziell, sicherheits-, idealistisch und multilateral orientierte Speicherkunden (Abbildung 7). Die Ergebnisse binärer Logit-Regressionen deuten zudem darauf hin, dass Investitionsbereitschaft und -treiber in den vier Gruppen divergieren und zielgruppenspezifische Fördermaßnahmen die vermehrte Nutzung von Kleinspeicheranlagen unterstützen können (vgl. Grimm, Kretschmer und Mehl, 2018 [12]).

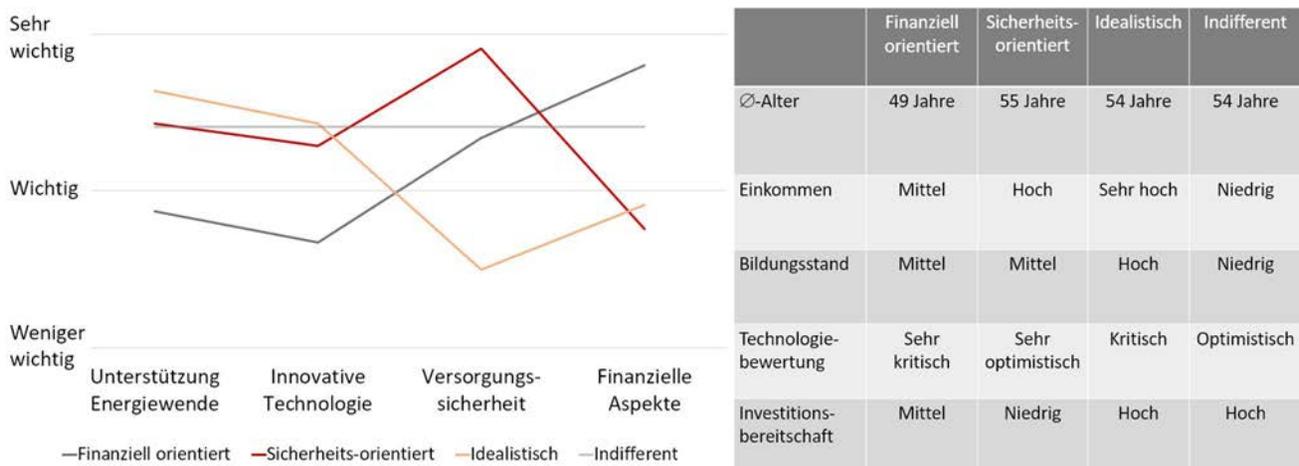


Abbildung 7: Relevanz verschiedener Kaufkriterien und Identifikation unterschiedlicher Investitionstypen. Eigene Darstellung.

Die Wissenschaftler im Forschungsschwerpunkt kooperieren umfangreich mit Wissenschaftlern aus anderen Projekten des EnCN. 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). 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 vorangetrieben. Der Anschluss der EnCN-Wissenschaftler an die betriebswirtschaftliche Forschung wurde im „Emerging Fields Initiative“ Projekt „Sustainable Business Models in Energy Markets: Perspectives for the Implementation of Smart Energy Systems“ der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ausgebaut, das im Jahr 2017 abgeschlossen wurde. Beteiligt waren die Professoren Fürst, Gatzert, Grimm, Voigt, Zöttl (Fachbereich Wirtschaftswissenschaften), Martin, Schmidt (Department Mathematik), sowie Brabec und Arlt (Technische Fakultät). Abgeschlossen wurde im Jahr 2017 ebenfalls das Projekt „Smart Grid Solar“, an dem Wissenschaftler des EnCN (die Professoren Grimm, Liers, Martin, Zöttl aus dem Projekt EMD, sowie die Professoren Brabec, German und Luther) unter Federführung des ZAE Bayern beteiligt waren.

3.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Prof. Dr. Veronika Grimm, Manuel Hauser, Prof. Dr. Roland Ismer, 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 ersten Jahr der zweiten Förderphase des EnCN konnten die EMD-Forschungsschwerpunkte erfolgreich vorangetrieben werden. Im Jahr 2018 ist der Ausbau der Vernetzung im EnCN durch gemeinsame Projekte mit Speicher B zur Wasserstofflogistik und mit EET zu Investitionsanreizen bei der Photovoltaik geplant. Die Vernetzung mit anderen Institutionen wird zum Beispiel im Rahmen von Workshops (zur Energiemarktmodellierung mit TUM, ifo, DIW, TUB im Februar 2018) und im Rahmen des BayWiss-Kollegs vorangetrieben. Neben zahlreichen Fachtagungen werden die Ergebnisse der Forschung auf der Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und der iSenEC präsentiert. Die Aktivitäten des EnCN sind zudem prägend für den FAU-Forschungsschwerpunkt „Energiesysteme der Zukunft“ und des Schwerpunkts Energiemärkte und Energiesystemanalyse des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Im Jahr 2018 werden im Bereich Energieforschung vier Tenure-Track Professuren an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ausgeschrieben, eine davon im Themenfeld Energiemarktdesign.

5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

Prof. Dr. Veronika Grimm war im Jahr 2017 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- 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)
- Managing Guest Editor, Games. Special Issue „Games and Market Design“ (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 Wirtschaftswissenschaften und Prodekanin der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (seit 2016)
- Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (seit 2015)
- Sprecherin des Forschungsschwerpunkts "Energiemärkte und Energiesystemanalyse" des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (seit 2015)
- Mitglied des Kuratoriums des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (seit 2015)
- Mitglied des Erweiterten Vorstands des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2015)
- Mitglied des Steering Boards, Campus Future Energy Systems (seit 2015)
- Mit-Herausgeberin von Perspektiven der Wirtschaftspolitik (PWP) (seit 2015)
- Mitglied der Expertenkommission „Stärkung von Investitionen in Deutschland“ des BMWi (seit 2014)
- Mitglied des Sozialwissenschaftlichen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2011)
- Mitglied des Industrieökonomischen Ausschusses des Vereins für Socialpolitik (VfS) (seit 2010)

Prof. Dr. Roland Ismer war im Jahr 2017 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)
- Mitherausgeber der Zeitschrift Mehrwertsteuerrecht (MwStR) (seit 2013)
- Stellvertretender Vorsitzender im Umsatzsteuerforum (seit 2012)
- Vorstandsmitglied des Vereins Nürnberger Steuergespräche e.V. (NSG) (seit 2010)

Prof. Dr. Alexander Martin war im Jahr 2017 in verschiedene Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied des Meeting Committee der European Mathematical Society (seit 2017)
- Mit-Herausgeber des 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)
- Mitglied von KoMSO - Committee for mathematical modeling, simulation, and optimization (seit 2012)
- Mit-Herausgeber des Vietnam Journal of Mathematics (seit 2011)
- Mitglied des Beirats von EURO Journal on Computational Optimization (seit 2011)
- Mitglied des Standing Committee der European Mathematical Society (seit 2010)
- Bereichskoordinator von Optimization Online, www.optimization-online.org (seit 2010)

- Mit-Herausgeber von Discrete Optimization (seit 2009)
- Mit-Herausgeber von Mathematical Programming C (seit 2008)
- Ehrenamtliches Mitglied des BMBF Beirates „Mathematik“ (seit 2007)

Prof. Dr. Frauke Liers war im Jahr 2017 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Mitglied des Vorstandes des SFB/TRR 154 „Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzen“ (seit 2017)
- Mitglied im Editorial Board der internationalen Zeitschrift „Optimization and Engineering“ (seit 2016)
- Studiendekanin, Department Mathematik, FAU (seit 2016)
- Mitglied im Editorial Board der internationalen Zeitschrift „Mathematical Methods of Operations Research“ (seit 2015)

Prof. Dr. Martin Schmidt war im Jahr 2017 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Technical Editor der internationalen Zeitschrift “Mathematical Programming Computation”

PD Dr. Lars Schewe war im Jahr 2017 in verschiedenen Gremien tätig, u. a.:

- Technical Editor der internationalen Zeitschrift “Mathematical Programming Computation”

Die Arbeit von Mitarbeitern im Projekt Energiemarktdesign wurden im Jahr 2017 mit folgenden Preisen ausgezeichnet:

- Mirjam Ambrosius. Fakultätsfrauenpreis der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät für das Forschungsprojekt Mathematische Modellierung des deutschen Strommarkts. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017
- Mirjam Ambrosius. Einladung zum 6th Lindau Meeting on Economic Sciences (Lindau Nobel Laureate Meeting). Lindau, 22.08.2017 – 25.08.2017
- Sandra Kretschmer. Theodor-Wessels-Preis. Beste Abschlussarbeit im Bereich der Energiewirtschaft. The Environmental Effect of Green Electricity Consumption: An Econometric Analysis. Köln, 08.11.2017
- Vanessa Krebs. Energiepreis des EnCN e.V. für ihre Masterarbeit. Grundlagenbetrachtungen zur Modellierung von Energiemärkten. Nürnberg, 13.12.2017

6 Veröffentlichungen

- [1] Ambrosius M.; V. Grimm; C. Sölch; G. Zöttl (2018). Investment Incentives For Flexible Demand Options Under Different Market Designs. Energy Policy. im Erscheinen.
- [2] 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. EnWZ - Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft. im Erscheinen.
- [3] Geißler B.; A. Morsi; L. Schewe; M. Schmidt (2017a). Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods. Informs Journal on Computing. <http://dx.doi.org/10.1287/ijoc.2017.0780>
- [4] Geißler B.; A. Morsi; L. Schewe; M. Schmidt (2017b). Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. SIAM Journal on Optimization, Bd. 27, S. 1611–1636. <http://dx.doi.org/10.1137/16M1069687>
- [5] Grimm V.; M. Ambrosius; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2017a). Modellierung von liberalisierten Strommärkten - Herausforderungen und Lösungen. Perspektiven der Wirtschaftspolitik, Bd. 18, Nr. 1. <http://dx.doi.org/10.1515/pwp-2017-0001>
- [6] Grimm V.; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2017b). Uniqueness of market equilibrium on a network: A peak-load pricing approach. European Journal of Operational Research, Bd. 261, Nr. 3, S. 971–983. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.036>

- [7] Grimm V.; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl (2017c). Optimal price zones of electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches. *Optimization Methods and Software*. <http://dx.doi.org/10.1080/10556788.2017.1401069>
- [8] Gugat M.; G. Leugering; A. Martin; M. Schmidt; M. Sirvent; D. Wintergerst (2017). MIP-based instantaneous control of mixed-integer PDE-constrained gas transport problems. *Computational Optimization and Applications*. <http://dx.doi.org/10.1007/s10589-017-9970-1>
- [9] Hante F.; G. Leugering; A. Martin; L. Schewe; M. Schmidt (2017). Challenges in Optimal Control Problems for Gas and Fluid Flow in Networks of Pipes and Canals: From Modeling to Industrial Applications. In *Industrial Mathematics and Complex Systems: Emerging Mathematical Models, Methods and Algorithms*, A. H. Manchanda Pammy; Lozi, René; Siddiqi, Hrsg. Singapore: Springer Singapore, S. 77–122.
- [10] Schmidt M.; u. a. (2017). GasLib—A Library of Gas Network Instances. *Data*, Bd. 2, Nr. 4, S. 40. <http://dx.doi.org/10.3390/data2040040>
- [11] Grimm V.; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2016a). Transmission and generation investment in electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. *European Journal of Operational Research*, Bd. 254, Nr. 2, S. 493–509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.044>

Preprints und eingereichte Arbeiten:

- [12] Grimm V.; S. Kretschmer; S. Mehl (2018). Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage. Working Paper, FAU Erlangen-Nürnberg. <http://ssrn.com/abstract=3122235>
- [13] Grimm V.; A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl (2018a). Market-based Redispatch May Result in an Inefficient Dispatch. Working Paper, FAU Erlangen-Nürnberg, <https://papers.ssrn.com/abstract=3120403>
- [14] Grimm V.; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl (2018b). Regionally differentiated network fees to provide proper incentives for generation investment. Working Paper, FAU Erlangen-Nürnberg, <https://papers.ssrn.com/abstract=3120476>
- [15] Grimm V.; J. Grübel; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2017d). Nonconvex Equilibrium Models for Gas Market Analysis: Failure of Standard Techniques and Alternative Modeling Approaches. <https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/frontdoor/index/index/docId/220>
- [16] Grimm V.; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl (2017e). A Multilevel Model of the European Entry-Exit Gas Market. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/05/6002.html
- [17] Groß M.; M. E. Pfetsch; L. Schewe; M. Schmidt; M. Skutella (2017). Algorithmic Results for Potential-Based Flows: Easy and Hard Cases. <https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/frontdoor/index/index/docId/153>
- [18] Gugat M.; G. Leugering; A. Martin; M. Schmidt; M. Sirvent; D. Wintergerst (2016). Towards Simulation Based Mixed-Integer Optimization with Differential Equations. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2016/07/5542.html
- [19] Hante F.; M. Schmidt (2017). Complementarity-Based Nonlinear Programming Techniques for Optimal Mixing in Gas Networks. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/09/6198.html
- [20] Hübner J.; M. Schmidt; M. C. Steinbach (2017). Optimization Techniques for Tree-Structured Nonlinear Problems. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/02/5845.html
- [21] Krebs V.; L. Schewe; M. Schmidt (2017). Uniqueness and Multiplicity of Market Equilibria on DC Power Flow Networks. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/10/6239.html
- [22] Krebs V.; M. Schmidt (2017). Uniqueness of Market Equilibria on Networks with Transport Costs. <https://opus4.kobv.de/opus4-trr154/frontdoor/index/index/docId/222>
- [23] Leugering G.; A. Martin; M. Schmidt; M. Sirvent (2017). Nonoverlapping Domain Decomposition for Optimal Control Problems governed by Semilinear Models for Gas Flow in Networks. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/11/6327.html
- [24] Mehrmann V.; M. Schmidt; J. Stolwijk (2017). Model and Discretization Error Adaptivity within Stationary Gas Transport Optimization. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/12/6365.html

- [25] Schewe L.; M. Schmidt (2016). Computing Feasible Points for MINLPs with MPECs. 2016.
http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2016/12/5778.html
- [26] Schmidt M.; M. Sirvent; W. Wollner (2017). A Decomposition Method for MINLPs with Lipschitz Continuous Nonlinearities. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/07/6130.html

7 Ausgerichtete Workshops

- [1] Vierteljahrestreffen für das Projekt Energiemarktdesign, am EnCN Nürnberg, 31.07.2017 & 27.10.2017
- [2] KickOff-Veranstaltung des EnCN²-Projektes „Energiemarktdesign“, am EnCN Nürnberg, 05.05.2017
- [3] Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES). Zweitätiges Seminar mit 17 Präsentation von Doktoranden der Energiewirtschaft aus ganz Europa, <http://yeees.eui.eu/nuremberg-2017/>, am EnCN Nürnberg, 27.04.2017 – 28.04.2017
- [4] 3. Nürnberg-München-Berlin Energy Workshop, Teilnehmer von: DIW Berlin, EnCN / FAU / ifo Institut / TU Berlin / TU München, an der FAU Erlangen-Nürnberg und am EnCN, 16.02.2017 – 17.02.2017

8 Gutachten

- [1] Grimm V.; G. Zöttl; C. Sölch (2017). Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017 der Monopolkommission.
- [2] Grimm V.; G. Zöttl; M. Ambrosius; B. Rückel; C. Sölch; gemeinsam mit der Prognos AG (2016b). Dezentralität und zellulare Optimierung - Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Gutachten im Auftrag der N-ERGIE AG.
- [3] Ismer R (2017). 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. 15.05.2017.

9 Vorträge und Poster

- [1] Ambrosius M. Price Zones and Investment Incentives in Electricity Markets: An Application of Multi-Level Optimization with Graph Partitioning. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [2] Ambrosius M. Optimal Price Zones for the German Electricity Market. 15th IAEE European Conference, Wien, 05.09.2017
- [3] Ambrosius M. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. V International Academic Symposium - Challenges for the Energy Sector, Barcelona, 07.02.2017
- [4] Egerer J. National-strategic transmission investment and zonal pricing. 15th IAEE European Conference, Wien, 06.09.2017
- [5] Egerer J. Modeling inefficiencies in booking-based gas markets. 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS 2017), Quebec Stadt, 18.07.2017
- [6] Egerer J. Transmission and generation investment for a core market region within a larger electricity market. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [7] Grimm V. Expertengespräch: Investitionen im Strommarkt: Was kostet die Energiewende? mit Grimm V und P. Graichen. 25. Handelsblatt Jahrestagung Energiewirtschaft 2018, Berlin, 25.01.2017
- [8] Grimm V. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets. DICE Research Seminar, HHU Düsseldorf, Düsseldorf, 07.02.2017
- [9] Grimm V. Präsentation des EnCN-Projekts „Energiemarktdesign“. Fachberatssitzung des EnCN, Nürnberg, 17.03.2017
- [10] Grimm V. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets. Texas A&M University at Qatar, Doha, 04.04.2017
- [11] Grimm V. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Monopolkommission, Bonn, 19.06.2017

- [12] Grimm V. System-optimal expansion of renewables in Germany: A model-based analysis of regionally differentiated tariffs. Seminar on Energy and Environmental Economics Munich (SEEM) at TUM, München, 22.06.2017
- [13] Grimm V. Dezentralität und Zellulare Optimierung. 8. Forum Energiewende, Siemens, Erlangen, 05.07.2017
- [14] Grimm V. Energiemarktdesign am EnCN. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.07.2017
- [15] Grimm V. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Lange Nacht der Wissenschaft in Nürnberg, Nürnberg, 21.10.2017
- [16] Grimm V. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Keynote auf der EnCN-Jahrestagung, Nürnberg, 13.12.2017
- [17] Grübel J. Welfare optimal nominations in passive gas networks and associated equilibria. 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS 2017), Quebec Stadt, 17.07.2017
- [18] Grübel J. Natural gas in Germany: Perspectives on market design and network infrastructure. Bayerisch-Russische Fachkonferenz „Wirtschaftswissenschaften“, Nürnberg, 10.11.2017
- [19] Grübel J. Evaluating capacities and welfare optimal nominations in gas networks. Workshop „Energiemarktmodellierung“, am EnCN Nürnberg, Nürnberg, 17.02.2017
- [20] Haußner M. Including Consumption of carbon-intensive Materials into Emissions Trading Schemes: An EU ETS Perspective. 23rd EAERE Conference, Athen, 01.07.2017
- [21] Haußner M. Structure of Public Innovation Support. Workshop on Policy Design for a Climate-Friendly Materials Sector, DIW Berlin, Berlin, 23.01.2017
- [22] Ismer R. Aktuelles aus der Rechtsprechung (Podiumsdiskussion). Aktuelle Entwicklungen im Energie- und Stromsteuerrecht. 8. Deutscher Energiesteuertag, BDI, Berlin, 15.12.2017.
- [23] Ismer R. Konsumabgabe auf CO₂-intensive Grundstoffe. Berlin Seminar on Energy and Climate Policy, DIW Berlin, Berlin, 17.10.2017
- [24] Ismer R. Structure of Public Innovation Support. Workshop on Policy Design for a Climate-Friendly Materials Sector, DIW Berlin, Berlin, 23.01.2017
- [25] T. Kleinert. Evaluating alternative market designs in electricity markets: a mixed-integer multilevel optimization model and global solution techniques. International Conference on Operations Research, Berlin, 06.09.2017
- [26] T. Kleinert. Mathematical Challenges in Energy Market Design. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [27] S. Kretschmer. Drivers for the Adoption of Domestic Electricity Storage: A Case Study from Southern Germany. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [28] Martin A. Network Flow Problems with Physical Constraints. International Conference on Network Optimization, Lissabon, Portugal, 26.02.2017
- [29] Martin A. Mixed Integer Programming for Energy Networks. Shell Lecture, CAAM Colloquium, Rice University, Houston TX, USA, 06.03.2017
- [30] Martin A. Network Flow Problems with Physical Transport. International Symposium on Operations Research 2017, Berlin, 07.09.2017
- [31] Rückel B. Regionally differentiated Network Fees to provide proper Incentives for Generation Investments. 23. Workshop des GEE Student Chapter, München, 28.07.2017
- [32] Rückel B. Regionally differentiated Network Fees to provide proper Incentives for Generation Investments. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [33] Runge P. Economic comparison of different electrofuels for energy scenarios in 2035. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017
- [34] Schewe L. Evaluating capacities and welfare optimal nominations in gas networks. Workshop „Energiemarktmodellierung“, am EnCN Nürnberg, Nürnberg, 17.02.2017
- [35] Schewe L. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. Workshop on Combinatorial Optimization, Aussois, 09.01.2017
- [36] Schewe L. Complexity of MINLPs from Gas Network Optimization. SIAM Conference on Optimization 2017, Vancouver, 23.05.2017

- [37] Schewe L. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. EUROPT 2017, Montreal, 13.07.2017
- [38] Schewe L. Solving Mixed-Integer Nonlinear Programs with hierarchical Mixed-Integer Linear Programming relaxations. IFORS 2017, Quebec Stadt, 18.07.2017
- [39] Schewe L. Wie Mathematik helfen kann, Gas-, Wasser- und Stromnetze besser zu planen. Unitag, Erlangen, 17.11.2017
- [40] Schmidt M. Mathematik für die Energiewende. Lange der Nacht der Wissenschaften, Nürnberg, 21.10.2017
- [41] Schmidt M. MIP-based instantaneous control of mixed-integer PDE-constrained gas transport problems. IFORS 2017, Quebec Stadt, 18.07.2017
- [42] Schmidt M. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Nonlinear Optimization. SIAM Conference on Optimization 2017, Vancouver, 24.05.2017
- [43] Schmidt M. Mathematical Optimization for Energy Networks. Advances in Renewable Energy Technologies (Texas A&M University at Qatar), Doha, 03.04.2017
- [44] Schmidt M. Optimal Price Zones of Electricity Markets: A Mixed-Integer Multilevel Model and Global Solution Approaches. Workshop Energiemärkte, Nürnberg, 16.02.2017
- [45] Schmidt M. Optimal Price Zones of Electricity Markets: A Mixed-Integer Multilevel Model and Global Solution Approaches. 21st Combinatorial Optimization Workshop, Aussois, 09.01.2017
- [46] Sölch C. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. IWF Doktorandenseminar, Nürnberg, 31.01.2017
- [47] Sölch C. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Klausurtagung des Bund Naturschutz Hof, Wunsiedel, 17.02.2017
- [48] Sölch C. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Bürgerdialog Stromnetz Expertenveranstaltung "Dezentrale Stromerzeugung und/oder Netzausbau?", Regensburg, 13.03.2017
- [49] Sölch C. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. 22nd Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES), Nürnberg, 27.04.2017
- [50] Sölch C. Investitionsanreize in Erzeugungs- und Netzkapazität am Strommarkt: Die Rolle des Marktdesigns. Stadt & Kreis Coburg Expertenveranstaltung "Sind weniger Netze mehr?", Coburg, 26.07.2017
- [51] Sölch C. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. 15th IAEE European Conference, Wien, 05.09.2017
- [52] Thürauf J. Discrete Selection of Diameters within Tree-Shaped Pipeline Networks. Interne EnCN Konferenz, Nürnberg, 13.12.2017

10 Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten

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

- [1] CMTS-Master-Seminar „Fünf Jahre nach Fukushima–Energiewende Quo Vadis: Dezentrale Antworten für eine globale Herausforderung?“ Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2016/2017
- [2] Seminar Energiemärkte. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [3] Seminar Energy Markets. Prof. Dr. Veronika Grimm / Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [4] Vorlesung Mikroökonomik. Prof. Dr. Veronika Grimm. Sommersemester 2017
- [5] Vorlesung Unternehmensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [6] Vorlesung Einkommensteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [7] Vorlesung Internationales Steuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Sommersemester 2017
- [8] Vorlesung Optimierung von Versorgungsnetzen. PD Dr. Lars Schewe / Prof. Dr. Martin Schmidt. Sommersemester 2017
- [9] Vorlesung Industrieökonomik (Bachelor). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [10] Vorlesung Industrieökonomik (Master). Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [11] Vorlesung Quantitative Methods in Energy Market Modelling. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Sommersemester 2017
- [12] Vorlesung Spieltheorie. Dr. Jonas Egerer. Wintersemester 2017/2018

- [13] Vorlesung Game Theory with Applications to Information Engineering. Prof. Dr. Veronika Grimm. Wintersemester 2017/2018
- [14] Vorlesung Grundlagen des Steuerrechts. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [15] Vorlesung Abgabenordnung. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [16] Vorlesung Umsatzsteuerrecht. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [17] Seminar Principles of EU Tax Law. Prof. Dr. Roland Ismer. Wintersemester 2017/2018
- [18] Vorlesung Advanced Mathematics for Economists. Prof. Dr. Martin Schmidt. Wintersemester 2017/2018
- [19] Vorlesung Optimization in Industry and Economy. Prof. Dr. Martin Schmidt. Wintersemester 2017/2018
- [20] Vorlesung Einführung in die Energiewirtschaft. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2017/2018
- [21] Vorlesung Advanced Industrial Organization. Prof. Dr. Gregor Zöttl. Wintersemester 2017/2018

Betreute Bachelorarbeiten:

- [1] Umstellung des Fördersystems im Erneuerbare-Energien-Gesetz: wettbewerbliche Ausschreibung von Windenergiekapazitäten. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Kernkraft in Frankreich: Renaissance oder schleichender Ausstieg durch Erneuerbare. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Europäische Emissionsstandards für Kohlekraftwerke - ökonomische Analyse der Auswirkung auf den deutschen Strommarkt. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [4] Flexibilisierung von Nachfrage vs. Netzausbau in Verteilnetzen. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [5] EU-Winterpackage vs. Weißbuch der Energie - ein Vergleich. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [6] Ökonomische Analyse und Bewertung eines verringerten Energieverbrauchs durch Effizienzsteigerungen. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [7] Strukturelle Einflüsse eines gestiegenen Elektromobilitätsaufkommens. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [8] Die Entwicklung, Ausgestaltung und Einflussgrößen des europäischen Emissionszertifikatshandels seit Entstehung. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [9] Netzstabilitätsanlagen als eine Übergangslösung um Netzengpässe durch den Atomausstieg und den verzögerten Stromnetzausbau in Deutschland im Rahmen der Energiewende zu vermeiden. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Förderung der erneuerbaren Energien nach EEG und Richtlinien zum Einspeisemanagement. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [11] Diskussion eines wissenschaftlichen Fachartikels zu „Regulation of network infrastructure investments“. Prof. Dr. Gregor Zöttl

Betreute Masterarbeiten:

- [1] Stochastische Optimierung zur Integration von Unsicherheiten in die Strommarktmodellierung: Auswirkungen unsicherer CO₂-Zertifikatspreise und Netzausbaukosten auf Investitionsentscheidungen im deutschen Strommarkt. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [2] Stochastische Optimierung in der Strommarktmodellierung: Netzausbau und Erzeugungsinvestitionen unter Unsicherheit hinsichtlich der Ausgestaltung von Preiszonen. Prof. Dr. Veronika Grimm
- [3] Discrete Selection of Diameters for Constructing Optimal Hydrogen Pipeline Networks. PD Dr. Lars Schewe
- [4] Mathematische Modellierung von Stromnetzen: Ein Vergleich von AC und DC-Modell hinsichtlich Investitionsentscheidungen. Prof. Dr. Frauke Liers
- [5] On the uniqueness of competitive market equilibria on DC networks. Prof. Dr. Martin Schmidt
- [6] Instruments to meet international environmental policy goals and their impacts on energy markets. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [7] Electricity Pricing and Congestion Management Regimes. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [8] Die Anreizwirkung staatlicher Steuerungsinstrumente zur Reduzierung der Flottenemissionen in der Automobilbranche. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [9] Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035. Prof. Dr. Gregor Zöttl
- [10] Eine Vorstellung und ökonomische Bewertung der neuen Regelungen des EEG. Prof. Dr. Gregor Zöttl

W1-Professur „Optimierung von Energiesystemen“

Projektbericht 2017

In der Zeit vor seiner Berufung auf die W1-Juniorprofessur für die Optimierung von Energiesystemen am EnCN lag der Forschungsfokus von Martin Schmidt insbesondere auf der Entwicklung von Methoden der kontinuierlichen Optimierung zur Lösung von diskret-kontinuierlichen Optimierungsproblemen und deren Anwendung auf realitätsnahe Modelle des Gastransports [13, 22, 39]. Die in dieser Zeit entstandenen Arbeiten reichen dabei von Reformulierungsstrategien für gemischt-ganzzahlige und nichtlineare Probleme [12, 25] bis hin zur Entwicklung neuer Algorithmen für nichtglatte Probleme mit Komplementaritätsrestriktionen [20]. Die Bedeutung der entwickelten Techniken für die Lösung praxisrelevanter Fragen wird unter anderem durch die Publikationen [19, 24] und die Beiträge [15, 17, 18, 21, 23] in dem Buch "Evaluating Gas Network Capacities" (gemeinsam mit 35 Ko-Autoren) deutlich, das schließlich 2016 mit dem "EURO Excellence in Practice Award" ausgezeichnet wurde.

Nach dem Antritt der Juniorprofessur für die Optimierung von Energiesystemen an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und dem Energie Campus Nürnberg im April 2014 beschäftigte sich Martin Schmidt neben anderen Themen weiter mit dem Problem des Gastransports. Schwerpunkt der dann folgenden Arbeiten war die Verzahnung von nichtlinearen und diskreten Techniken zur Lösung diskret-kontinuierlicher Optimierungsprobleme. In den Arbeiten [3, 16] führte diese Verzahnung schließlich dazu, dass die bis dato größten Instanzen von nicht-konvexen MINLPs auf Transportnetzwerken gelöst werden konnten. Außerdem konnten auf Basis dieser Arbeiten die am Anwendungsproblem entwickelten Techniken in [2] derart verallgemeinert werden, dass eine gänzlich neue Methode für gemischt-ganzzahlig nichtlineare Optimierungsprobleme erreicht wurde.

Diese Erfolge führten 2015 zur Beteiligung Schmidts am Sonderforschungsbereich/Transregio 154 "Mathematical Modelling, Simulation and Optimization using the Example of Gas Networks", dessen Idee die Verzahnung von Modellierung, Simulation und Optimierung ist. Diese Beteiligung führte zu weiteren Kooperationen im gemischt-ganzzahligen und nichtlinearen Optimierungskontext. So wurden in [1, 6–8, 36] die Kompetenzen der diskreten Optimierung mit denen der PDE-Optimierung verzahnt, um zu dekompositionsbasierten Algorithmen für gemischt-ganzzahlige und nichtlineare Optimierungsprobleme mit PDE-Restriktionen zu gelangen. Außerdem wurden die Arbeiten an Reformulierungen von diskret-kontinuierlichen Problemen fortgesetzt, die u. a. zu MPEC-basierten Heuristiken für allgemeine MINLPs [37] oder zu auf inversen Problemen basierenden MPEC-Formulierungen für nichtglatte Probleme führte [30].

Neben diesen Arbeiten lag ein zweiter Schwerpunkt auf der mehrstufigen Modellierung und Optimierung mit Anwendungen im Strombereich. Diese Arbeiten fanden ebenfalls zu einem großen Teil im Rahmen des Energie Campus Nürnberg statt, in dessen erste Phase Schmidt von 2014 bis 2016 Projektleiter des Teilprojekts "Gekoppelte Energiesysteme" war. Die aus der Modellierung von Strommärkten motivierten Problemstellungen führen auf Bi- oder allgemeiner Multilevel-Probleme, die sowohl Ganzzahligkeitsbedingungen als auch Nichtlinearitäten enthalten und die somit zu den herausforderndsten der Optimierung gehören. Für diese Problemklasse wurden in [4, 11] ebenfalls dekompositionsbasierte Lösungstechniken entwickelt. Außerdem konnten in [27, 28, 5, 33, 34, 38] neue theoretische Resultate in Bezug auf die Modellierung und Wohlgestelltheit von Gleichgewichtsproblemen erzielt werden. Diese

KONTAKT

Prof. Dr. Martin Schmidt

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
martin.schmidt@fau.de

Telefon
+49 911 56854-9131

Web
www.encn.de

Resultate haben wichtige Implikationen für die ökonomische Analyse von Energiemärkten. In Ergänzung hierzu arbeitet Schmidt aktuell in Kooperation mit Betriebswirten an mehrstufigen stochastischen und gemischt-ganzzahligen Modellen für neue Varianten der Portfolio-Optimierung mit Anwendungen im Bereich der erneuerbaren Energien, die u.a. auf den Arbeiten [32, 9] basieren, in denen maßgeschneiderte parallele und verteilte Algorithmen zur Lösung dieser Probleme vorgestellt wurden.

Neben den genannten mathematischen Publikationen führten die Forschungsarbeiten auch zu anwendungsorientierten Artikeln [31, 14, 26], zur Entwicklung von hoch-qualitativer Software und zur Publikation von öffentlich zugänglichen Instanz-Bibliotheken für spezielle Problemklassen. So hat Schmidt in den vergangenen Jahren maßgeblich an der Entwicklung der Software "LaMaTTO++" zur Modellierung und Lösung von gemischt-ganzzahligen und nichtlinearen Optimierungsproblemen auf Netzwerken sowie an der Gasnetzwerk-Bibliothek GasLib [10] mitgewirkt. Die resultierende Expertise im Bereich der computergestützten Optimierung hat u.a. zu der Mitgliedschaft im Editorial Board bei der Zeitschrift "Mathematical Programming Computation" und zu diversen Gutachter-Tätigkeiten für hochrangige Fachjournale wie "SIAM Journal on Optimization", "Mathematical Programming", "Mathematical Programming Computation", "INFORMS Journal on Computing", "Optimization and Engineering", "OR Spectrum", "Applied Energy", "European Journal of Operational Research" oder "Mathematical Reviews/MathSciNet" geführt.

Außerdem hat Martin Schmidt in den vergangenen Jahren mehrfach Sessions und Streams auf nationalen und internationalen Konferenzen organisiert und damit auch zur internationalen Sichtbarkeit des Energie Campus beigetragen -- darunter die Session "Optimization of Gas Networks" bei der "IFORS 2017" in Quebec City, die Session "Continuous Techniques for MINLPs with Differential Equations in Gas Transport" bei der "SIAM Conference on Optimization (OP17)" in Vancouver, der Stream "Optimization of Gas Networks" (mit fünf Sessions; gemeinsam mit Dr. Lars Schewe) in der Area "Graphs and Networks" bei der "EURO 2016 - 28th European Conference on Operational Research" in Posen, die Session "Network Management Regimes in Electricity and Gas Markets" im Stream "Energy and Environment" bei der "OR 2015 - International Conference on Operations Research" in Wien oder der "Workshop on Gas Transport and Gas Market Modeling" im Jahr 2014 in Nürnberg.

Zum Zweck des Ausbaus der mathematischen Expertise im Bereich der Energieforschung konnte Martin Schmidt auch zusätzliche Drittmittel einwerben. So erforscht Schmidt aktuell in einem vom BMBF geförderten Projekt in Kooperation mit der Universität Trier, der TU Berlin sowie des Fraunhofer ITWM die optimale Steuerung von Fernwärmenetzen und analysiert in einem von der EU geförderten Forschungsprogramms die Behandlung unsicherer Daten in ökonomischen Gleichgewichtsmodellen. Zuletzt wird in einem von der DFG im Rahmen des TRR 154 geförderten Teilprojekts die mathematische Analyse von Gasmärkten vorangetrieben. Weitere Anträge sowohl bei der DFG als auch beim BMWi - beides zu angewandten mathematischen Themen im Energiebereich - befinden sich aktuell in der Begutachtung.

Veröffentlichungen

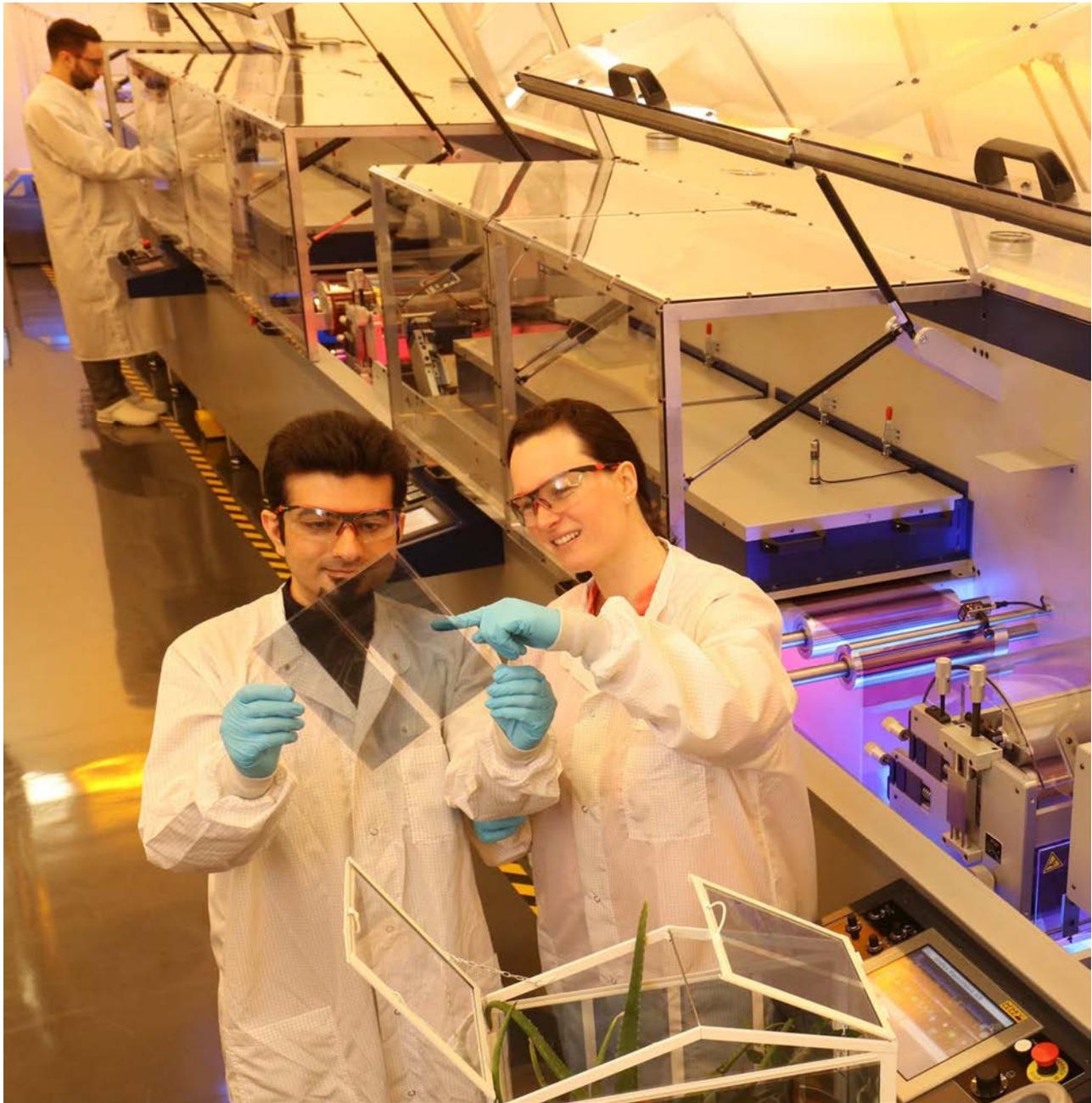
- [1] G. Leugering, A. Martin, M. Schmidt und M. Sirvent. "Nonoverlapping Domain Decomposition for Optimal Control Problems governed by Semilinear Models for Gas Flow in Networks". In: *Control and Cybernetics* (2018). Im Erscheinen. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/11/6327.html.
- [2] B. Geißler, A. Morsi, L. Schewe und M. Schmidt. "Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps". In: *SIAM Journal on Optimization* 27.3 (2017), S. 1611–1636. DOI: 10.1137/16M1069687.
- [3] B. Geißler, A. Morsi, L. Schewe und M. Schmidt. "Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods". In: *INFORMS Journal on Computing* (2017). Im Erscheinen. DOI: 10.1287/ijoc.2017.0780. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2016/06/5523.html.
- [4] V. Grimm, T. Kleinert, F. Liers, M. Schmidt und G. Zöttl. "Optimal price zones of electricity markets: a mixed-integer multilevel model and global solution approaches". In: *Optimization Methods and Software* (2017). Online first. DOI: 10.1080/10556788.2017.1401069.
- [5] V. Grimm, L. Schewe, M. Schmidt und G. Zöttl. "Uniqueness of market equilibrium on a network: A peak-load pricing approach". In: *European Journal of Operational Research* 261.3 (2017), S. 971–983. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.036.
- [6] M. Gugat, G. Leugering, A. Martin, M. Schmidt, M. Sirvent und D. Wintergerst. "MIP-Based Instantaneous Control of Mixed-Integer PDE-Constrained Gas Transport Problems". In: *Computational Optimization and Applications* (2017). Online first. DOI: 10.1007/s10589-017-9970-1. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/04/5955.html.
- [7] M. Gugat, G. Leugering, A. Martin, M. Schmidt, M. Sirvent und D. Wintergerst. "Towards Simulation Based Mixed-Integer Optimization with Differential Equations". In: *Networks* (2017). Accepted for publication in *Networks*. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2016/07/5542.html.
- [8] F. M. Hante, G. Leugering, A. Martin, L. Schewe und M. Schmidt. "Challenges in Optimal Control Problems for Gas and Fluid Flow in Networks of Pipes and Canals: From Modeling to Industrial Applications". In: *Industrial Mathematics and Complex Systems: Emerging Mathematical Models, Methods and Algorithms*. Hrsg. von P. Manchanda, R. Lozi und A. H. Siddiqi. Industrial and Applied Mathematics. Singapore: Springer Singapore, 2017, S. 77–122. DOI: 10.1007/978-981-10-3758-0_5.
- [9] J. Hübner, M. C. Steinbach und M. Schmidt. "A Distributed Interior-Point KKT Solver for Multistage Stochastic Optimization". In: *INFORMS Journal on Computing* 29.4 (2017), S. 612–630. DOI: 10.1287/ijoc.2017.0748.
- [10] M. Schmidt, D. Aßmann, R. Burlacu, J. Humpola, I. Joormann, N. Kanelakis, T. Koch, D. Oucherif, M. E. Pfetsch, L. Schewe, R. Schwarz und M. Sirvent. "GasLib-A Library of Gas Network Instances". In: *Data* 2.4 (2017). DOI: 10.3390/data2040040. URL: <http://www.mdpi.com/2306-5729/2/4/40>.
- [11] V. Grimm, A. Martin, M. Schmidt, M. Weibelzahl und G. Zöttl. "Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes". In: *European Journal of Operational Research* 254.2 (2016), S. 493–509. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.03.044.
- [12] D. Rose, M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "Computational optimization of gas compressor stations: MINLP models versus continuous reformulations". In: *Mathematical Methods of Operations Research* 83.3 (2016), S. 409–444. DOI: 10.1007/s00186-016-0533-5.
- [13] M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "High detail stationary optimization models for gas networks: validation and results". In: *Optimization and Engineering* 17.2 (2016), S. 437–472. DOI: 10.1007/s11081-015-9300-3.
- [14] P. Domschke, M. Groß, F. Hante, B. Hiller, L. Schewe und M. Schmidt. "Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung von Gastransportnetzwerken". In: *gwf-Gas|Erdgas* 156.11 (2015), S. 880–885. URL: <https://www.di-verlag.de/de/Zeitschriften/gwf-Gas-Erdgas/2015/11/Mathematische-Modellierung-Simulation-und-Optimierung-von-Gastransportnetzwerken>.
- [15] A. Fügenschuh, B. Geißler, R. Gollmer, A. Morsi, M. E. Pfetsch, J. Rövekamp, M. Schmidt, K. Spreckelsen und M. C. Steinbach. "Physical and technical fundamentals of gas networks". In: *Evaluating Gas Network Capacities*. Hrsg.

- von T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch und L. Schewe. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015. Kap. 2, S. 17–44. DOI: 10.1137/1.9781611973693.ch2.
- [16] B. Geißler, A. Morsi, L. Schewe und M. Schmidt. "Solving power-constrained gas transportation problems using an MIP-based alternating direction method". In: Computers & Chemical Engineering 82 (2015), S. 303–317. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.07.005.
- [17] B. Hiller, J. Humpola, T. Lehmann, R. Lenz, A. Morsi, M. E. Pfetsch, L. Schewe, M. Schmidt, R. Schwarz, J. Schweiger, C. Stangl und B. M. Willert. "Computational results for validation of nominations". In: Evaluating Gas Network Capacities. Hrsg. von T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch und L. Schewe. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015. Kap. 12, S. 233–270. DOI: 10.1137/1.9781611973693.ch12.
- [18] I. Joormann, M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "What does "feasible" mean?" In: Evaluating Gas Network Capacities. Hrsg. von T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch und L. Schewe. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015. Kap. 11, S. 211–232. DOI: 10.1137/1.9781611973693.ch11.
- [19] M. E. Pfetsch, A. Fügenschuh, B. Geißler, N. Geißler, R. Gollmer, B. Hiller, J. Humpola, T. Koch, T. Lehmann, A. Martin, A. Morsi, J. Rövekamp, L. Schewe, M. Schmidt, R. Schultz, R. Schwarz, J. Schweiger, C. Stangl, M. C. Steinbach, S. Vigerske und B. M. Willert. "Validation of nominations in gas network optimization: models, methods, and solutions". In: Optimization Methods and Software 30.1 (2015), S. 15–53. DOI: 10.1080/10556788.2014.888426.
- [20] M. Schmidt. "An interior-point method for nonlinear optimization problems with locatable and separable nonsmoothness". In: EURO J. Comput. Optim. 3.4 (Nov. 2015), S. 309–348. DOI: 10.1007/s13675-015-0039-6.
- [21] M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "An MPEC based heuristic". In: Evaluating Gas Network Capacities. Hrsg. von T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch und L. Schewe. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015. Kap. 9, S. 163–180. DOI: 10.1137/1.9781611973693.ch9.
- [22] M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "High detail stationary optimization models for gas networks". In: Optimization and Engineering 16.1 (2015), S. 131–164. DOI: 10.1007/s11081-014-9246-x.
- [23] M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "The precise NLP model". In: Evaluating Gas Network Capacities. Hrsg. von T. Koch, B. Hiller, M. E. Pfetsch und L. Schewe. SIAM-MOS series on Optimization. SIAM, 2015. Kap. 10, S. 181–210. DOI: 10.1137/1.9781611973693.ch10.
- [24] A. Fügenschuh, B. Geißler, R. Gollmer, C. Hayn, R. Henrion, B. Hiller, J. Humpola, T. Koch, T. Lehmann, A. Martin, R. Mirkov, A. Morsi, J. Rövekamp, L. Schewe, M. Schmidt, R. Schultz, R. Schwarz, J. Schweiger, C. Stangl, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "Mathematical optimization for challenging network planning problems in unbundled liberalized gas markets". In: Energy Systems 5.3 (2014), S. 449–473. DOI: 10.1007/s12667-013-0099-8.
- [25] M. Schmidt, M. C. Steinbach und B. M. Willert. "A Primal Heuristic for Nonsmooth Mixed Integer Nonlinear Optimization". In: Facets of Combinatorial Optimization. Hrsg. von M. Jünger und G. Reinelt. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 295–320. DOI: 10.1007/978-3-642-38189-8_13.
- [26] A. Martin, B. Geißler, C. Hayn, A. Morsi, L. Schewe, B. Hiller, J. Humpola, T. Koch, T. Lehmann, R. Schwarz, J. Schweiger, M. Pfetsch, M. Schmidt, M. Steinbach, B. Willert und R. Schultz. "Optimierung Technischer Kapazitäten in Gasnetzen". In: Optimierung in der Energiewirtschaft. VDI-Berichte 2157. 2011, S. 105–114. URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-zib/frontdoor/index/index/docId/1512>.
- [27] V. Grimm, J. Grübel, L. Schewe, M. Schmidt und G. Zöttl. Nonconvex Equilibrium Models for Gas Market Analysis: Failure of Standard Techniques and Alternative Modeling Approaches. Techn. Ber. Nov. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/11/6332.html.
- [28] V. Grimm, L. Schewe, M. Schmidt und G. Zöttl. A Multilevel Model of the European Entry-Exit Gas Market. Techn. Ber. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/05/6002.html.
- [29] M. Groß, M. E. Pfetsch, L. Schewe, M. Schmidt und M. Skutella. Algorithmic Results for Potential-Based Flows: Easy and Hard Cases. Techn. Ber. Aug. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/08/6185.html.
- [30] F. M. Hante und M. Schmidt. Complementarity-Based Nonlinear Programming Techniques for Optimal Mixing in Gas Networks. Techn. Ber. Sep. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/09/6198.html.
- [31] B. Hiller, T. Koch, M. E. Pfetsch, M. Schmidt, B. Geißler, R. Henrion, I. Joormann, A. Martin, A. Morsi, W. Römisch, L. Schewe, R. Schultz und M. C. Steinbach. Capacity Evaluation for Large-Scale Gas Networks. Techn. Ber. Friedrich-

- Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017. URL: http://www.mso.math.fau.de/fileadmin/wima/data_members/schmidt/forne-komso.pdf.
- [32] J. Hübner, M. Schmidt und M. C. Steinbach. Optimization Techniques for Tree-Structured Nonlinear Problems. Techn. Ber. Feb. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/02/5845.html.
- [33] V. Krebs, L. Schewe und M. Schmidt. Uniqueness and Multiplicity of Market Equilibria on DC Power Flow Networks. Techn. Ber. Okt. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/10/6239.html.
- [34] V. Krebs und M. Schmidt. Uniqueness of Market Equilibria on Networks with Transport Costs. Techn. Ber. Nov. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/11/6334.html.
- [35] V. Mehrmann, M. Schmidt und J. J. Stolwijk. Model and Discretization Error Adaptivity within Stationary Gas Transport Optimization. Techn. Ber. FAU Erlangen-Nürnberg, Department Mathematik; TU Berlin, Institut für Mathematik, Dez. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/12/6365.html.
- [36] M. Schmidt, M. Sirvent und W. Wollner. A Decomposition Method for MINLPs with Lipschitz Continuous Nonlinearities. Techn. Ber. 2017. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2017/07/6130.html.
- [37] L. Schewe und M. Schmidt. Computing Feasible Points for MINLPs with MPECs. Techn. Ber. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dez. 2016. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2016/12/5778.html.
- [38] L. Schewe und M. Schmidt. The Impact of Physics on Pricing in Energy Networks. Techn. Ber. 2015. DOI: 10.2139/ssrn.2628611. URL: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2628611.
- [39] M. Schmidt. "A Generic Interior-Point Framework for Nonsmooth and Complementarity Constrained Nonlinear Optimization". Diss. Leibniz Universität Hannover, 2013. A. Mustermann; B. Musterfrau. Allgemeine Auslassungen zum Thema Energie. European Energy Journal, 14, 455, 2014

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

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

Projektbericht 2017

Die Photovoltaik (PV) muss kurzfristig einen raschen Einzug von wesentlicher Größe in die Städte finden und dafür sorgen, dass Strom dort erzeugt wird, wo er auch sofort verbraucht wird. Folglich sind neue PV-Technologien zu entwickeln, die sowohl in Fassaden als auch in Fenster integriert werden können und somit eine bedarfsgerechte und kostengünstige Stromerzeugung in der Stadt erlauben. Neben der bauwerksintegrierten Photovoltaik (BIPV) stellt die Stromversorgung mobiler Verbraucher (Smartphones, Internet of Things) eine neue Herausforderung für die PV dar. Beide Anwendungen erfordern Eigenschaften der PV-Module, die von herkömmlichen Technologien nicht zu leisten sind, wie Leichtigkeit, Flexibilität, optische Attraktivität sowie gute Integrierbarkeit, bspw. in Textilien oder Fassadenelemente. Das Projekt EET stellt sich diesen aktuellen Herausforderungen durch die Entwicklung geeigneter PV-Technologien und entsprechender effizienter Produktionsverfahren in vier Teilprojekten.

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

Im **Projektteil TP2 – zerstörungsfreie bildgebende Analyse (Dr. Thomas Heumüller, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden neue bildgebende optische Verfahren zur inline Qualitätskontrolle von PV Modulen während der Produktion entwickelt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von bildgebenden Methoden für nicht planare (3D) Oberflächen.

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 in realen Anwendungen getestet werden.

Im **Projektteil TP4 – Fassadenintegrierte PV im urbanen Umfeld (Doz. Dr. Hans-Joachim Egelhaaf, Prof. Dr. Christoph Brabec)** werden sowohl transparente als auch opake Photovoltaikmodule entwickelt, die den Anforderungen an die Gebäudeintegration genügen. Diese Module werden in relevantem Maßstab in der Solarfabrik der Zukunft hergestellt und in entsprechende Objekte integriert.

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
<http://tinyurl.com/h6r3su6>

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 2017 fokussierten sich die Arbeiten auf das Arbeitspaket „2D-Druck“ (AP1). Meilensteine oder Übergabepunkte gab es 2017 in diesem Teilprojekt keine.

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	

„Shy Tech“ ist der Begriff für den neuzeitlichen Entwicklungstrend, dass Hightech unauffällig („schüchtern“) in unseren Alltag und in Alltagsgegenstände integriert werden. Komplexe Elektronik soll überall verfügbar sein, aber nicht als solche wahrgenommen werden. Bei diesem Vorhaben spielt natürlich auch Photovoltaik eine große Rolle (z.B. als Energielieferant für mobile Anwendungen), wobei insbesondere flexible, gedruckte Photovoltaikmodule durch anpassungsfähige Designs nahezu überall ihren Einsatz finden können.

Ein bedeutender Schritt in Richtung „schüchterne Photovoltaik“ ist uns 2017 mit der Entwicklung einer nahezu unsichtbaren Modulverschaltung (Engl.: interconnection) gelungen. Klassische P2-Strukturierungsmethoden stellen die Verbindung zwischen oberer und unterer Elektrode her, indem der gesamte Schichtstapel entweder nur an manchen Stellen des Moduls aufgebracht wird (typisches „Streifenlayout“) oder zunächst vollflächig gedruckt und danach anschließend mittels Laserablation an einigen Stellen wieder entfernt wird, wodurch makroskopisch sichtbare weiße Bereiche im Modul entstehen.

Uns ist es mit Hilfe des neuartigen Konzepts der *Silberbrücken* gelungen, diese Bereiche mikroskopisch klein und opak zu gestalten, so dass sie für das menschliche Auge kaum wahrnehmbar sind. In einem ersten Schritt werden dabei mittels Tintenstrahldruck Punkte aus hochleitfähigen Silbernanopartikeln im μm -Maßstab auf das Substrat gedruckt (Abbildung 1, links oben). Da diese Silberpunkte mehrere μm hoch sind, werden sie durch ein anschließendes vollflächiges Auftragen des kompletten Schichtstapels ($<1 \mu\text{m}$) nicht vollständig bedeckt, so dass sie einen direkten Kontakt zwischen den beiden Elektroden herstellen können, ohne dass eine nachträgliche P2-Strukturierung (z.B. mittels Laserablation) erfolgen muss (Abbildung 1, rechts oben). Somit liefert dieser Prozessweg nicht nur den ästhetischen Mehrwert eines unsichtbaren Interconnects, sondern ermöglicht auch einen exzellenten geometrischen Füllfaktor und spart Prozessschritte, da der gesamte Schichtstapel auf einmal (ohne eine unterbrechende P2-Strukturierung) gedruckt werden kann.

Des Weiteren haben wir eine auf dem Konzept der Kelvin-Brücke basierende Messmethode entwickelt, die es uns erlaubt, den Interconnect-Widerstand durch diese Silberbrücken exakt zu bestimmen. Die daraus gewonnenen Parameter wurden anschließend in einer Finite Elemente (FEM)-Simulation verarbeitet (Abbildung 1, links unten), welche den kritischen

Schwellwert berechnet, ab dem die Modulperformance unter einem zu hohen Interconnect-Widerstand leidet. Die Ergebnisse dieser Simulation konnten anschließend experimentell verifiziert werden (Abbildung 1, rechts unten).

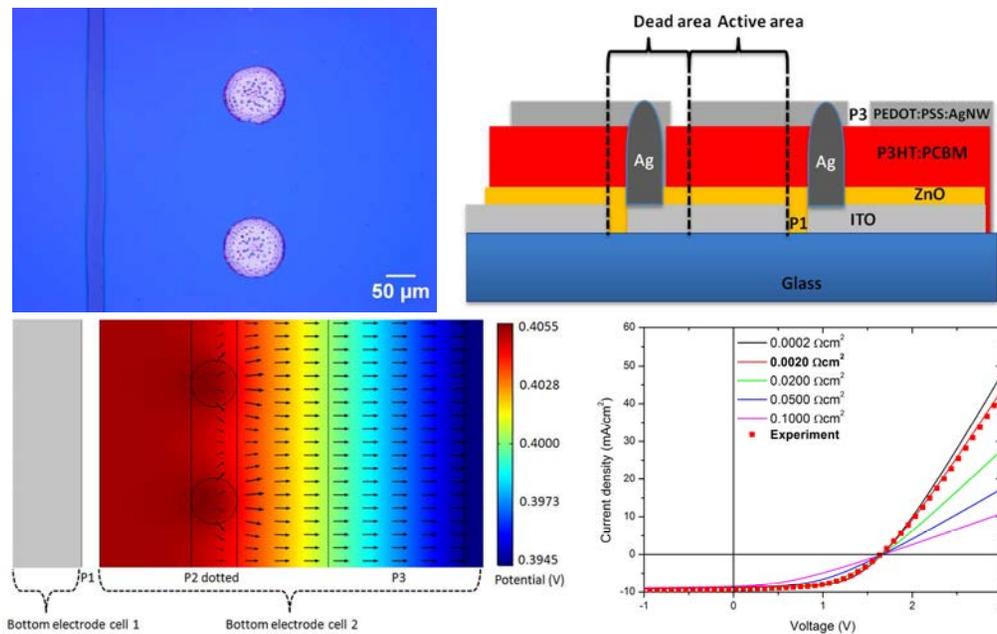


Abbildung 1: Illustration des Silberbrücken-Konzepts. Links oben: Mikroskopaufnahme tintenstrahlgedruckter Interconnect-Silberpunkte. Rechts oben: Schematische Darstellung eines Modulquerschnitts mit einer Zellverschaltung über gedruckte Silberbrücken. Links unten: Finite Elemente (FEM)-Simulation der elektrischen Potentialverteilung in einem Solarmodul mit gedruckten Interconnect-Punkten. Rechts unten: Simulierte und gemessene IV-Kurven eines solchen Solarmoduls für unterschiedlich hohe Interconnect-Widerstände.

Als Anwendungsbeispiel für „Shy Photovoltaics“ haben wir das „Solar-Wrist“- Band entwickelt (Abbildung 2), welches die Implementierung von organischen Solarmodulen in off-grid Consumer-Produkte demonstriert. Das Solar-Wrist-Band ist für den Wearable-Bereich konzipiert und kann auf Grund der flexiblen Gestaltung als Armband oder als Band für eine Smartwatch bzw. einen Fitnessstracker genutzt werden. Es produziert während des Tragens Strom (sowohl bei direkter Sonneneinstrahlung, als auch in Räumen) und kann somit die Zeit bis zum nächsten Aufladen deutlich verlängern bzw. im Idealfall das Gerät komplett autark betreiben. Das „Solar-Wrist“-Band ist zudem essentieller Bestandteil unserer Patentanmeldung zu einer Vorrichtung zur sensorgestützten Datenerfassung.^[27]

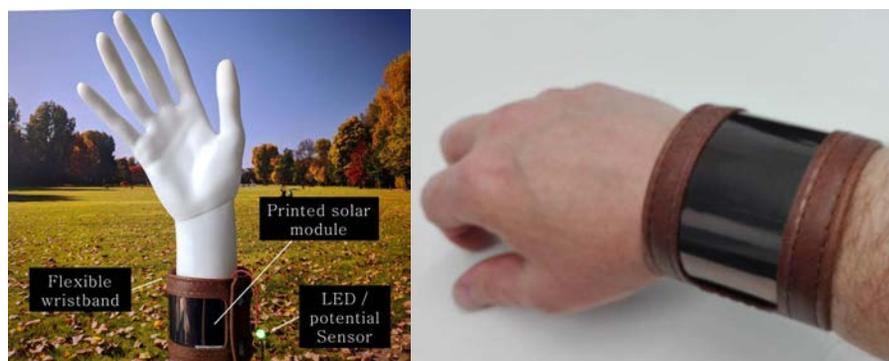


Abbildung 2: Prototyp eines von uns entwickelten „Solar-Wrist“- Bands, einem Armband mit integriertem flexiblem Photovoltaikmodul, welches eine Smartwatch oder einen Fitnessstracker im Alltag laufend mit Strom versorgen kann.

Kooperationen

In Kooperation mit dem TP2 wurden erste Vorversuche zur in-line Qualitätskontrolle unternommen.

Im Rahmen dieses Teilprojekts fand eine intensive Mitarbeit im ZIM-Netzwerk „Digitaldruck für Technische Textilien“ (DIGI4TT) statt, um Möglichkeiten der Integration gedruckter Elektronik in Funktionstextilien zu identifizieren.

Im Rahmen eines Industrieprojekts wurde mit den bayerischen Firmen LS Lasersystems GmbH und innolas Photonics GmbH eine Laseranlage für die Strukturierung von Solarmodulen mittels ns-Pulsen aufgebaut.

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 mit dem Aufbau einer Anlage zum Druck von OPV-Modulen auf 3D Oberflächen begonnen. In Kooperation mit dem TP2 werden erste Verfahren für die in-line Qualitätskontrolle in die Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage implementiert.

Akquirierte Projekte: Es wurden drei Industrieprojekte eingeworben, die in thematischem Zusammenhang mit diesem Teilprojekt stehen. Gemeinsam mit den Industriepartnern werden Laserprozesse für die monolithische Verschaltung von Solarzellen zu Modulen sowie Silbertinten für die drucktechnische Herstellung opaker und semitransparenter Elektroden entwickelt. Außerdem wurde bei der AiF ein Projektantrag zur Unterstützung beim Aufbau einer Anlage zum Druck von OPV-Modulen auf 3D Oberflächen eingereicht (OLE3D).

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

Im Rahmen des EET Projekts werden völlig neue Beschichtungsverfahren entwickelt, die eine Prozessierung auf 3D Freiformen ermöglichen sollen. Während dieses Entwicklungsprozesses sind zunächst Materialinhomogenitäten und andere Filmdefekte zu erwarten, die möglichst früh erkannt werden müssen, um eine effiziente Optimierung zu gewährleisten. Optische Messverfahren sind geeignet für inline-Qualitätskontrolle direkt nach der Abscheidung des Films noch bevor weitere aufwändige Prozessschritte zur Fertigstellung des Bauteils durchgeführt werden. Als besonders aussagekräftig hat sich in ersten Vorversuchen die Photolumineszenzmessung (PL) herausgestellt. Während die PL Intensität eine direkte Aussage über die Fähigkeit des Films zur Excitontrennung und damit der Erzeugung freier Ladungsträger treffen kann, sind über die spektrale Verteilung der PL zusätzliche Rückschlüsse über die Morphologie der Schicht möglich. Durch die Verwendung einer besonders hochauflösenden PL Kamera können zusätzlich zu Materialinhomogenitäten auch kleinste Defekte sichtbar gemacht werden, die sonst nur mit Thermographiemessungen am fertigen Bauteil erkennbar sind.

In einem ersten Entwicklungsschritt wurde ein hochauflösendes PL-Imaging Setup implementiert, bei dem wesentliche Fortschritte zur homogenen Anregung auf großer Fläche mit Hilfe eines Lasers und rotierender Diffusorscheibe sowie eine hohe Auflösung für die Abbildung kleiner Defekte erreicht wurde (Abbildung 3). Jedoch sind mit der verwendeten Kamera noch keine Aussagen über die spektrale Verteilung der PL möglich.

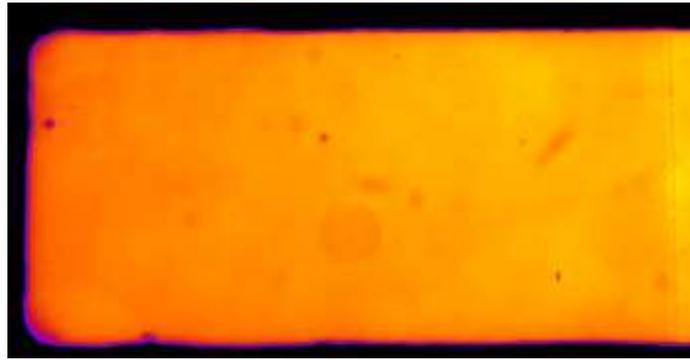


Abbildung 3: Photolumineszenzbild einer organischen Solarzelle mit kleinsten Punktdefekten. Die Erkennung solcher Defekte sowie die Überwachung der Schichthomogenität sind mittels PL-Messungen direkt nach der Filmabscheidung und vor der Fertigstellung des Bauteils möglich.

In einem zweiten Entwicklungsschritt wurden die Notwendigkeit und das Potential einer spektralen Analyse der Photolumineszenz vorgenommen. Mit einem existierenden spektral aufgelösten Messsystem wurden punktuell im Labormaßstab prozessierte Solarzellen vermessen. Mehrere aktive Schichten aus Donor-Akzeptor Mischungen wurden bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen und Trocknungsbedingungen hergestellt. Die Effizienzen (PCE) der fertigen Solarzellen weisen entsprechend der eingestellten Prozessparameter deutliche Schwankungen von ca. 4% PCE bis 7% PCE auf. In den spektral aufgelösten PL Messungen (Abbildung 4) konnten deutliche Unterschiede im Emissionsspektrum der jeweiligen Filme abgebildet werden. Insbesondere die starke Ausprägung eines Peaks bei 800 nm korreliert mit einer hohen Effizienz der fertigen Solarzelle. Zusätzliche strukturelle Aufklärungsmethoden weisen auf einen Zusammenhang dieses Peaks mit erhöhter Kristallinität der aktiven Schicht und damit effizienterem Ladungstransport hin.

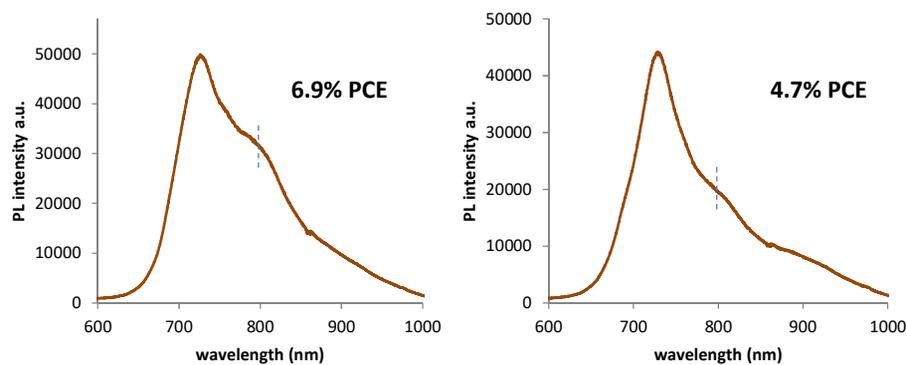


Abbildung 4: Photolumineszenzspektren zweier Prototypsolarzellen, die mit unterschiedlichen Parametern prozessiert wurden und deutlich unterschiedliche Effizienzen (PCE) aufweisen.

Die Möglichkeit, mittels spektral aufgelöster PL Rückschlüsse über die Morphologie der aktiven Schicht und damit auch ersten Indikatoren für die Effizienz der fertigen Solarzelle zu erhalten, stellt diese Methode in den Mittelpunkt der zukünftigen Aktivitäten im Teilprojekt.

Eine exzellente Gelegenheit, die spektralen Informationen mit der bildgebenden Inlineüberwachung von Filmdefekten zu verbinden, ergibt sich durch eine Spezialentwicklung der Firma Photon aus Kanada. Mit einer sogenannten hyperspektralen Kamera lassen sich bei höchster Auflösung für jeden Pixel Spektren im Bereich von 400-1000 nm aufnehmen. Die Akquise dieses Hightech Instruments wird im weiteren Projektverlauf durch effektive und umfassende Qualitätskontrolle die Entwicklung neuer Druckverfahren im Teilprojekt EET unterstützen und beschleunigen. Die Projektmittel werden dadurch ebenfalls ausgeschöpft. In enger Kooperation mit dem Teilprojekt 1 „2D- und 3D-Freiform Beschichtungsprozesse zur Herstellung von PV-Elementen für das urbane Umfeld“ sind bereits vorläufige Untersuchungen zur inline Qualitätskontrolle erfolgt und werden nach Inbetriebnahme der Hyperspektralkamera noch deutlich intensiviert werden.

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

Schaltbare Verglasungen helfen den Energiebedarf von tagsüber benutzten Gebäuden deutlich zu verringern, vor allem über Reduktion der Kosten für Kühlung, Beleuchtung und Heizung. In diesem Teilprojekt sollen Nanokristalle basierende Materialien entwickelt und hergestellt werden, aus denen smarte und schaltbare Fenster mit drei 3 möglichen Schaltzuständen realisiert werden können. Im ersten Projektjahr wurden dazu vor allem die in der Literatur beschriebenen Synthesen für plasmonische Metall-Oxid Nanokristalle adaptiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Nanopartikel aus ITO gelegt, für welche die gewünschten elektrochromen Effekte in elektrochemischen Zellen in der Literatur demonstriert worden sind. Auch CeO_2 Nanokristalle, aus denen die passiven Gegenelektroden hergestellt werden sollen, wurden synthetisiert. Die synthetisierten Materialien zeigen die gewünschten optischen Eigenschaften. ITO Nanopartikel (Abbildung 5b) ergeben in hochkonzentrierten Lösungen eine grüne Farbe, während sie in verdünnten Lösungen (Abbildung 5a) und dünnen Filmen (Abbildung 5c) eine hohe Transparenz im gesamten sichtbaren Spektralbereich aufweisen. Im Infraroten zeigen sie eine ausgeprägte Absorption aufgrund der Plasmonenresonanz (Abbildung 5d), die in den smarten Fenstern mit Hilfe eines angelegten elektrischen Feldes verstimmt werden soll. Als erster Projekt-Meilenstein wurde der Schichtwiderstand der ITO Nanokristallfilme optimiert. Dazu wurden die organischen Liganden die sich nach der Synthese an der Oberfläche der Nanokristalle befinden, entfernt und gegen andere, kürzere Liganden ersetzt. Angestrebt wurde ein Schichtwiderstand von $10 \text{ k}\Omega$. Ein deutlich besserer Wert von $< 1 \text{ k}\Omega$ wurde erreicht, wenn die Nanokristallschichten bei 600°C in Luft ausgebacken wurden. Ohne diesen Schritt, durch reines chemisches Entfernen der Liganden, oder durch Austauschen der Liganden konnte der Zielwert allerdings nicht erreicht werden, und die Schichtwiderstände liegen in diesen Fällen im $\text{M}\Omega$ Bereich. Auch wenn dieser Wert deutlich über dem von uns gewähltem Zielwert liegt, könnten auch diese Filme in den schaltbaren Fenstern funktionieren. Dazu müssen aber erst entsprechende Test-Bauteile angefertigt werden.

Für die Funktionalität der elektrochromen Elektroden aus plasmonischen Nanopartikeln ist es wichtig, dass in die abgeschiedenen Elektroden der Elektrolyt des schaltbaren Fensters eindringen kann. Um dies zu ermöglichen, sollten die Elektroden eine poröse Struktur aufweisen. Poren mit nano-Dimensionen werden in den Elektroden durch Beigabe eines Opfermaterials, üblicherweise eines Polymers, erzielt, welches während eines Ausheizprozesses aus der Elektrode entfernt wird. Als Alternative zu diesem Prozess haben wir begonnen, ITO Elektroden über eine galvanische Abscheidung herzustellen. Dieses Verfahren resultiert nach einem Oxidationsschritt in einer porösen, nanopartikulären Schicht, die im Elektronenmikroskop sehr ähnlich aussieht wie die Elektroden aus kolloidalen Nanokristallen, und deshalb auch in den schaltbaren Fenstern eingesetzt werden kann. Letzteres gilt es im nächsten Projektabschnitt zu prüfen.

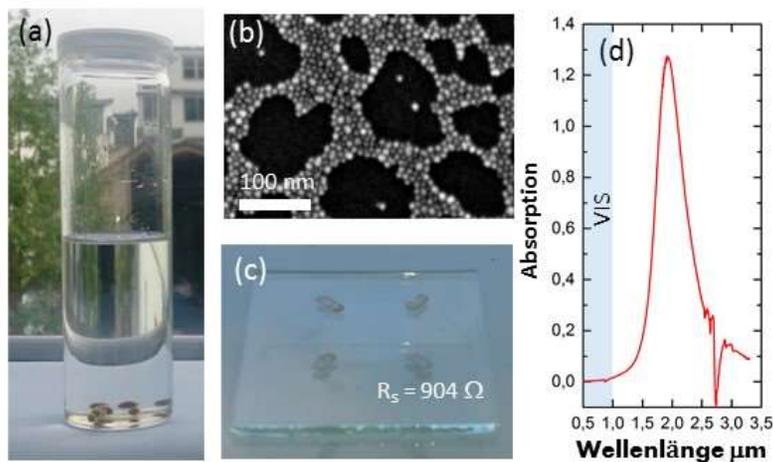


Abbildung 5: (a) Suspension mit ITO Nanokristallen, die im Elektronenmikroskop kleiner als 10 nm sind (b). (c) Transparente Schicht aus Nanokristallen, mit einem Schichtwiderstand von $< 1 \text{ k}\Omega$. (d) Die ITO Nanokristalle zeigen im infraroten Spektralbereich eine ausgeprägte Plasmonenresonanz, die in den schaltbaren Fenstern elektrisch verstimmbar werden soll.

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

Tabelle 2 zeigt den Arbeits- und Zeitplan des Teilprojektes „Bauwerkintegrierte PV im urbanen Umfeld“ (TP4). Im Jahr 2017 beschränkten sich die Arbeiten auf die Arbeitspakete „Module“ (AP1) und „Lebensdauer“ (AP3). Im zweiten Halbjahr 2017 gab es einen Meilenstein „Effizienzlücke zwischen Laborzelle und R2R-Modul auf $< 10\%$ reduziert“ (M1M). Übergabepunkte gab es 2017 in diesem Teilprojekt keine.

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

Ein wichtiger Aspekt der Modulentwicklung in AP1 ist die Verbesserung der Moduleffizienz, wofür es verschiedene Ansatzpunkte gibt. Eine wichtige Möglichkeit ist die Verwendung von neuen, leistungsfähigeren Materialien. Ausgehend von einem Solarmodul auf Basis von P3HT:PCBM, dem am weitest verbreiteten Materialsystem für organische Photovoltaik, mit einer Effizienz von 2,4%, haben wir das Akzeptormolekül (das Fulleren PCBM) systematisch durch andere kleine Moleküle, sog. Nicht-Fulleren-Akzeptoren (NFAs), ersetzt. Diese neuartigen Moleküle besitzen viele Vorteile gegenüber den üblicherweise verwendeten Fullerenen, wie z.B. eine verbesserte Lichtabsorption, eine größere Variabilität der Energieniveaus sowie eine bessere Prozessierbarkeit. Innerhalb dieser Materialklasse haben wir das NFA-

Molekül „O-IDTBR“ (Abbildung 6, links) als vielversprechendsten Kandidaten identifiziert und konnten damit P3HT:O-IDTBR-Photovoltaikmodule (Abbildung 6, rechts) mit einer Effizienz von 5.0% herstellen. Das entspricht einer Effizienzsteigerung um einen Faktor >2 gegenüber dem Standard-Materialsystem P3HT:PCBM, allein durch den Austausch des Akzeptormoleküls.

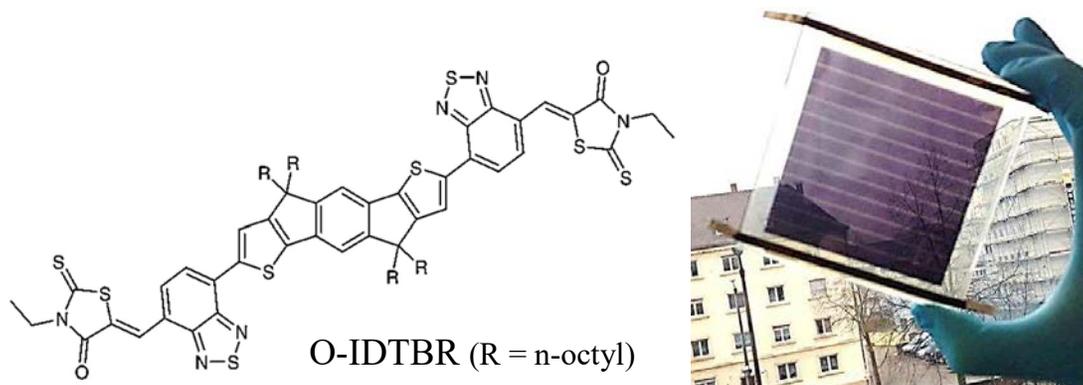


Abbildung 6: Links: Chemische Struktur des Nicht-Fulleren-Akzeptormoleküls O-IDTBR. Rechts: Semitransparentes Photovoltaikmodul auf Basis des aktiven Materialsystems P3HT:O-IDTBR.

Vergleicht man die Performance von P3HT:O-IDTBR-Modulen (12 Zellen in Serie, 60 cm² Fläche, 93% GFF) und –Zellen (0.1 cm² Fläche), die beide im Labor gerakelt wurden, sieht man einen Effizienzverlust von ca. 4.6%, was wir hauptsächlich auf einen Flächenskalierungseffekt zurückführen, da sich erhöhte Defektwahrscheinlichkeiten und Inhomogenitäten erst auf größeren Flächen bemerkbar machen. Dieser Verlust beinhaltet jedoch auch schon den Übertrag von einer einzelnen Zelle zu einem 12-Zellen-Modul inkl. Verschaltung mittels Laserstrukturierung, was wir aufgrund der von uns optimierten Laserprozesse und –parameter ohne Effizienzverlusten realisieren konnten.

Geht man einen weiteren Schritt in Richtung Rolle-zu-Rolle-Fertigung, ist die Verwendung einer Schlitzdüse die Auftragsmethode der Wahl. Vergleicht man ein P3HT:PCBM-Modul, welches wir mittels Schlitzdüsenbeschichtung hergestellt haben mit einem gerakelten P3HT:PCBM-Modul, so sieht man einen Effizienzunterschied von ca. 5.8%. Da die Beschichtung mit einer Schlitzdüse einen deutlich komplexeren Prozess darstellt als das Rakeln (höhere Lösungsvolumina, durchgehende Temperierung der Lösung in Reservoir, Schläuchen und Düse, homogene Flussdynamik der Lösung über die gesamte Breite der Düse), bedarf dieser prozesstechnische Übertrag einiges an Erfahrung und entsprechend optimiertes Equipment. Auf Basis der 2017 gesammelten Erfahrung sind wir zuversichtlich, dass wir diese Effizienzlücke in 2018 auf unter 5% verringern können.

Tabelle 3: Grün: Durchschnittliche Performance von im Labor gerakelten Zellen (erste Zeile) und Modulen (zweite Zeile) auf Basis des aktiven Materialsystems P3HT:IDTBr. Orange: Performance von im Labor mittels Rakel (dritte Zeile) bzw. Schlitzdüse (vierte Zeile) hergestellten Modulen auf Basis des aktiven Materialsystems P3HT:PCBM.

Materialsystem	Beschichtungs-technik	Layout	Jsc (pro Zelle) [mA/cm ²]	Voc (pro Zelle) [mV]	FF [%]	PCE [%]
P3HT:O-IDTBr	Rakel	Zelle (0.1 cm ²)	11.30	698	66.6	5.25
P3HT:O-IDTBr	Rakel	Modul (64 cm ²)	10.87	711	64.9	5.01 (-4.6%)
P3HT:PCBM	Rakel	Modul (64 cm ²)	8.64	501	55.6	2.41
P3HT:PCBM	Schlitzdüse	Modul (64 cm ²)	7.48	524	58.0	2.27 (-5.8%)

Da auf Grund technischer Schwierigkeiten der Rolle-zu-Rolle-Betrieb der Lasermaschine in 2017 noch nicht ohne Einschränkungen betriebsfähig war, konnten bisher noch keine größeren Mengen aussagekräftiger Solarmodule vollständig im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt werden. Die entsprechenden Anpassungen an der Laseranlage wurden

Ende 2017 durchgeführt und erfolgreich getestet, so dass eine vollständige Rolle-zu-Rolle-Modulproduktion ab dem ersten Quartal 2018 realisiert werden kann. Die R2R-Beschichtungsanlage (Abbildung 7, links) wurde in 2017 bereits erfolgreich eingefahren und die Beschichtungsprozesse der verschiedenen Materialien getestet. Abbildung 7 (rechts) zeigt einen Effizienzvergleich von P3HT:PCBM-Solarzellen, deren Elektronentransportschicht (ETL, gelb), zusätzlich die aktive Schicht (ETL+AL, rot) bzw. alle Schichten (ETL+AL+HTL, blau) auf der R2R-Anlage gedruckt wurden. Bei den ersten beiden Variationen wurden die restlichen Schichten jeweils im Labor gerakelt und alle Werte wurden auf den durchschnittlichen Wert von vollständig gerakelten Laborzellen normiert. Wie man sieht, erleiden die Zellen keinerlei Effizienzeinbußen beim Übertrag vom Rakelprozess im Labor zum Schlitzdüsendruck auf der R2R-Beschichtungsanlage.

Der Ende 2017 angesetzte Meilenstein M1M „Effizienzlücke zwischen Laborzelle und R2R-Modul auf <10% reduziert“ konnte auf Grund der angesprochenen technischen Schwierigkeiten mit dem R2R-Betrieb der Lasermaschine nicht in einem direkten Vergleich experimentell verifiziert werden. Jedoch zeigen die oben dargestellten Prozesshochskalierungen (Zelle→Modul, Rakel→R2R-Druck) und das geringe Ausmaß der damit einhergehenden Performanceeinbußen, dass sich die Effizienzlücke zwischen Laborzelle und R2R-Modul tatsächlich im Bereich <10% aufhalten wird, sobald der vollständige Rolle-zu-Rolle-Betrieb etabliert ist, und somit der Meilenstein M1M erreicht ist.

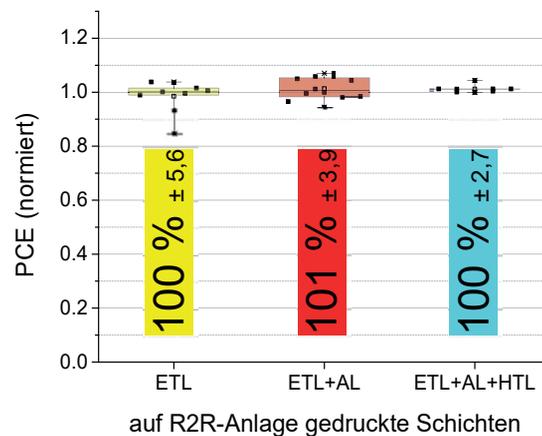
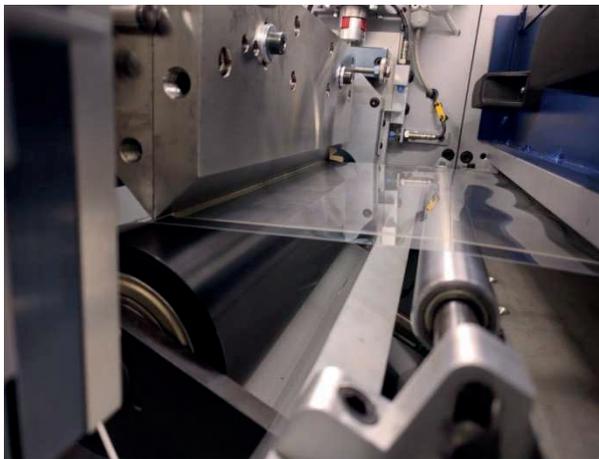


Abbildung 7: Links: Foto eines Schlitzdüsendruckwerks der R2R-Anlage in Aktion. Rechts: Zellperformance von P3HT:PCBM-Zellen mit auf der R2R-Anlage gedruckten Schichten normiert auf vollständig gerakelte Standardlaborzellen.

Neben der anfangs präsentierten Verdopplung der Effizienz bringt die Materialkombination P3HT:O-IDTBR noch einen weiteren entscheidenden Vorteil gegenüber P3HT:PCBM mit sich. Die in AP3 durchgeführten Lebenszeitmessungen haben ergeben, dass P3HT:O-IDTBR-Zellen deutlich resistenter gegen Bestrahlung in inerter Atmosphäre sind. Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Abfall des Kurzschlussstroms (links) und der Effizienz (rechts) im Verlauf einer solchen Degradationsstudie. Da die Verluste im Kurzschlussstrom mit O-IDTBR deutlich geringer ausfallen als bei PCBM, ergeben sich stabilere Effizienzwerte und damit eine längere Lebensdauer der Solarzellen.

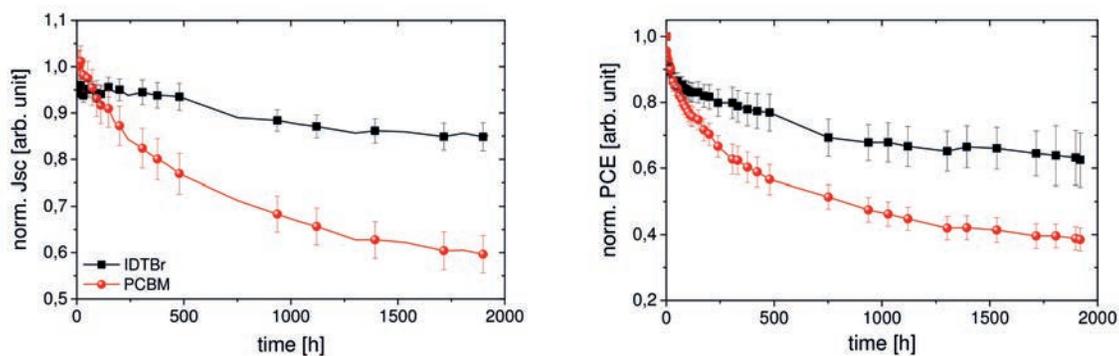


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms (links) und der Effizienz (rechts) von P3HT-Solarzellen mit O-IDTBR (schwarz) und PCBM (rot) als Akzeptormaterial unter Dauerbestrahlung mit einer Halogen-Metaldampflampe in inerter Atmosphäre.

Eine weitere Lebenszeitstudie aus AP3 betrifft die Photooxidation der aktiven Materialien in organischen Solarzellen. Da diese Materialien sehr empfindlich gegen Sauerstoff in Kombination mit Lichteinstrahlung sind, bedarf es in der Anwendung stets einer Verkapselung mit Hochbarrierefolien. Da letztere aber dennoch immer eine endliche Diffusionsrate für Sauerstoff aufweisen, ist es wünschenswert die Resistenz der aktiven Materialien gegen solche externen Einflüsse so hoch wie möglich zu gestalten, um die Lebensdauer der Solarzelle zu maximieren. 2017 ist es gelungen das Antioxidationsmittel $\text{Ni}(\text{dtc})_2$ (Abbildung 9, links oben) in die aktive Schicht organischer Solarzellen als stabilisierendes Additiv zu integrieren. Der Stabilisator schützt die aktiven Materialien vor radikalischen Angriffen (z.B. durch reaktive Sauerstoffspezies wie Superoxid) und verlängert dadurch die Lebensdauer der Solarzellen unter Bestrahlung an Luft (Abbildung 9, rechts oben und unten).

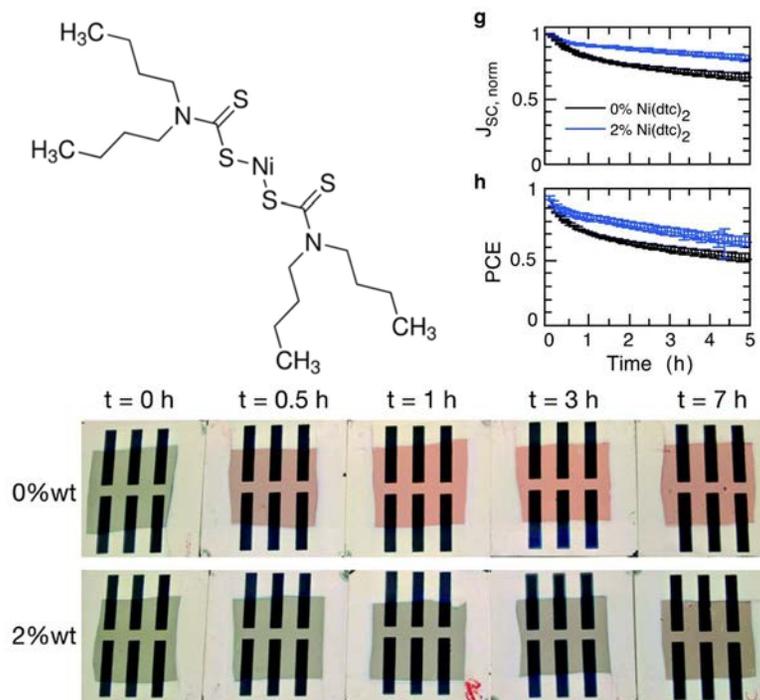


Abbildung 9: Links oben: Chemische Strukturformel des Antioxidationsmittels $\text{Ni}(\text{dtc})_2$. Rechts oben: Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms (J_{sc}) und der Effizienz (PCE) unverkapselter PTB7:PC70BM-Solarzellen mit (blau) und ohne (schwarz) Beimengung von 2% des Stabilisatoradditivs $\text{Ni}(\text{dtc})_2$ unter Bestrahlung in trockener Luft. Unten: Optische Veränderung der entsprechenden Solarzellen im Verlauf der Degradation.

Kooperationen

Andere EnCN-Gruppen: Gemeinsam mit Prof. Dentel und Prof. Kießling von der THN wurde das BMWi-Projekt „Fassade 3“ zur Errichtung einer multifunktionalen Demonstrationsfassade beantragt. Dieses wurde zum 01.12.2017 bewilligt. Weitere Partner in diesem Projekt sind Bavarian Optics, OPVIUS GmbH, die Hohenstein Institute für Textilforschung und ACX GmbH.

Externe Partner: Die Nicht-Fulleren-Akzeptoren wurden vom Imperial College zur Verfügung gestellt.

In einem Industrieprojekt werden Rolle-zu-Rolle-Verfahren für die drucktechnische Herstellung von Solarmodulen auf der Basis von Perowskiten entwickelt. In einem weiteren Industrieprojekt werden Verfahren zur Verlängerung der Lebensdauer gedruckter Solarmodule erforscht.

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.

Akquirierte Projekte umfassen das BMWi-Projekt „Fassade3“ zur Errichtung einer multifunktionalen Demonstrationsfassade und zwei Industrieprojekte zur Aufskalierung von Perowskit-Solarmodulen bzw. zur Lebensdauer organischer Solarmodule.

5 Schlussworte

Alle Teilprojekte des Projekts EET sind erfolgreich gestartet und haben ihre für 2017 vorgesehenen Ziele erreicht (s. Highlights 2017). Die für das Jahr 2017 bewilligten Personal- und Sachmittel wurden weitgehend verausgabt. Die entsprechenden Investitionsmittel konnten hingegen aufgrund von zeitaufwändigen Entscheidungsprozessen bzw. verspätet begonnenen Begleitprojekten nicht planmäßig ausgegeben werden. Die entsprechenden Geräte sind jedoch bereits bestellt bzw. werden in 2018 beschafft.

Im ersten Jahr des Projekts konnten bereits sieben Drittmittel-Projekte eingeworben werden. Die Tatsache, dass es sich bei vieren davon um direkte Industrieprojekte handelt, bestätigt die Relevanz der im Projekt EET betriebenen Forschung für die Praxis. Besonders hervorzuheben ist dabei ein im Jahre 2017 begonnenes Projekt, das bei erfolgreicher Durchführung bereits im Jahr 2018 in direkten Aufträgen für zwei bayerische Unternehmen resultieren wird.

Im Jahr 2018 werden die begonnenen Arbeiten fortgesetzt. Insbesondere das Zusammenarbeiten zwischen den Teilprojekten 2 und 1 sowie zwischen den Teilprojekten 3 und 4 werden dabei bereits greifbare Resultate hinsichtlich in line-Qualitätskontrolle bzw. smarterer Fenster zeitigen.

6 Vorträge & Poster 2017

- [1] C. J. Brabec; A. Distler; H.-J. Egelhaaf. From Lab to Fab: Printed Photovoltaics. LOPEC, München, 2017.
- [2] K. C. Tam; P. Maisch; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. Inkjet printed organic solar cells and modules. 10th National Conference on OLED and Photoelectric Properties, Taiyuan/China, 2017.
- [3] H.-J. Egelhaaf; P. Maisch; K. C. Tam; C. J. Brabec. Tintenstrahldruck transluzenter Silberelektroden für die organische Elektronik. Ink Jet Printed Silver Nanowire Electrodes. Rapid.Tech, Erfurt, 2017.
- [4] P. Maisch; K.C. Tam; H.-J. Egelhaaf; H. Scheiber; E. Maier; C.J. Brabec. Inkjet Printed Silver Nanowire Electrodes for Visually Non-Obstructive and Efficient Semitransparent Organic Solar Cells and Modules. ISFOE, Thessaloniki/Griechenland, 2017.
- [5] K. C. Tam; P. Maisch; L. Lucera; F. W. Fecher; H.-J. Egelhaaf; H. Scheiber; E. Maier; C. J. Brabec. Organic solar module fabrication by inkjet printing method. Next-Gen III: PV Materials, Groningen/Niederlande, 2017.
- [6] F. Machui; S. Strohm; S. Langner; P. Kubis; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. P3HT based PV modules with power conversion efficiencies of 5% processed by industrial scalable methods. ISFOE, Thessaloniki/Griechenland, 2017.
- [7] A. Distler; H.-J. Egelhaaf; K. C. Tam; P. Maisch; P. Schilinsky; I. Channa; M. Winkler; C. J. Brabec. Towards the Commercialization of Printed Photovoltaics. Progress in Organic Optoelectronics, Valencia/Spain, 2017.
- [8] H.-J. Egelhaaf; F. Machui; P. Maisch; K. C. Tam; P. Kubis; M. Wagner; L. Lucera; C. J. Brabec. Gedruckte organische Solarmodule. 32. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2017.
- [9] F. Machui; P. Kubis; M. Wagner; P. Maisch; K. C. Tam; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. Integration semitransparenter organischer Photovoltaikmodule in Fassadenelemente. 9. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik, Bad Staffelstein, 2017.
- [10] W. Heiss. Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals. Nanoscience with nanocrystals, Braga/Portugal, 2017.

7 Veröffentlichungen 2017

- [11] P. Maisch; L. Lucera; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Flexible Solar Cells. In: Flexible Carbon Based Electronics. Eds.: V. Palermo; P. Samori. Wiley-VCH.
- [12] M. Salvador; N. Gasparini; J. Darío Perea; A. Distler; S. Paletti; L. Inasaridze; P.A. Troshin; L. Lüer; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Suppressing photooxidation of conjugated polymers and their blends with fullerenes through nickel chelates. *Energy Environ. Sci.*, 10 (9), 2005, 2017.
- [13] L. Lucera; F. Machui; H.D. Schmidt; T. Ahmad; P. Kubis; S. Strohm; J. Hepp; A. Vetter; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec. Printed semi-transparent large area organic photovoltaic modules with power conversion efficiencies of close to 5%. *Org. Electronics*, 45, 209, 2017.
- [14] S. A. Dowland; M. Salvador; J. D. Perea; N. Gasparini; S. Langner; S. Rajoelson; H. H. Ramanitra; B. D. Lindner; A. Osvet; C. J. Brabec; R. C. Hiorns; H.-J. Egelhaaf. Suppression of Thermally Induced Fullerene Aggregation in Polyfullerene-Based Multiacceptor Organic Solar Cells. *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, 9 (12), 10971, 2017.
- [15] N. Gasparini; L. Lucera; M. Salvador; M. Prosa; G. D. Spyropoulos; P. Kubis; H.-J. Egelhaaf; C.J. Brabec; T. Ameri. High-performance ternary organic solar cells with thick active layer exceeding 11% efficiency. *Energy Environ. Sci.*, 10 (4), 885, 2017.
- [16] N. Gasparini; M. Salvador; S. Strohm; T. Heumueller; I. Levchuk; A. Wadsworth; J. H. Bannock; J. C. de Mello; H.-J. Egelhaaf; D. Baran; I. McCulloch; C.J. Brabec. Burn-in Free Nonfullerene-Based Organic Solar Cells. *Adv. Energy Mater.*, 7 (19), 1700770, 2017.
- [17] N. Gasparini; M. Salvador; T. Heumueller; M. Richter; A. Classen; S. Shrestha; G. J. Matt; S. Holliday; S. Strohm; H.-J. Egelhaaf; A. Wadsworth; D. Baran; I. McCulloch; C. J. Brabec. Polymer:Nonfullerene Bulk Heterojunction Solar Cells with Exceptionally Low Recombination Rates. *Adv. Energy Mater.*, 7 (22), 1701561, 2017.
- [18] M. Sytnyk; M. Jakesova; M. Litvinukova; O. Mashkov; D. Kriegner; J. Stangl; J. Nebesarova; F. W. Fecher; W. Schofberger; N. S. Sariciftci; R. Schindl; W. Heiss; E. D. Glowacki. Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic semiconductor hierarchical nanocrystals. *Nature Communications*, 8, 91, 2017.
- [19] S. Shrestha; R. Fischer; G. J. Matt; P. Feldner; T. Michel; A. Osvet; I. Levchuk; B. Merle; S. Golkar; H. W. Chen; S. F. Tedde; O. Schmidt; R. Hock; M. Ruhrig; M. Goken; W. Heiss; G. Anton; C. J. Brabec. High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers. *Nature Photonics*, 11, 436, 2017.
- [20] M. I. Nugraha; S. Kumagai; S. Watanabe; M. Sytnyk; W. Heiss; M. A. Loi; J. Takeya. Enabling Ambipolar to Heavy n-Type Transport in PbS Quantum Dot Solids through Doping with Organic Molecules. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9, 18039, 2017.
- [21] M. I. Nugraha; R. Häusermann; S. Watanabe; H. Matsui; M. Sytnyk; W. Heiss; J. Takeya; M. A. Loi. Broadening of Distribution of Trap States in PbS Quantum Dot Field-Effect Transistors with High-k Dielectrics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9, 4719, 2017.
- [22] M. Sytnyk; S. Yakunin; W. Schofberger; R. T. Lechner; M. Burian; L. Ludescher; N. A. Killilea; A. A. Yousefi Amin; D. Kriegner; J. Stangl; H. Groiss; W. Heiss. Quasi-epitaxial Metal-Halide Perovskite Ligand Shells on PbS Nanocrystals. *ACS Nano*, 11, 1246, 2017.
- [23] M. Richter; T. Heumüller; G. J. Matt; W. Heiss; C. J. Brabec. Carbon Photodetectors: The Versatility of Carbon Allotropes. *Advanced Energy Materials*, 7, 1601574, 2017.
- [24] M. I. Nugraha; H. Matsui; S. Watanabe; T. Kubo; R. Häusermann; S. Z. Bisri; M. Sytnyk; W. Heiss; M. A. Loi; J. Takeya. Strain-Modulated Charge Transport in Flexible PbS Nanocrystal Field-Effect Transistors. *Adv. Electron. Mater.*, 3, 1600360, 2017.

8 Patente 2017

- [25] P. Maisch; L. Eisenhofer; H.-J. Egelhaaf; K. C. Tam; C. J. Brabec; M. Voigt. A Generic Approach to Achieve Wetting Using Inkjet Printed Anchoring Points (angemeldet).

- [26] P. M. Allemand; R. Gupta; H.-J. Egelhaaf; P.-C. Chen; M. Wagner; P. Maisch; K. Pichler; K. C. Tam; P. Kubis. Organic Solar Module and/or Fabrication Method (angemeldet).
- [27] F. Högl; J. Hauch; H.-J. Egelhaaf; P. Maisch; K. C. Tam; C. J. Brabec. Vorrichtung zur sensorgestützten Datenerfassung (angemeldet).

W2-Professur „Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien“

Projektbericht 2017

Die W2 Stützprofessur von Wolfgang Heiss beschäftigt sich mit der Synthese lösungsprozessierten Halbleitermaterialien als Ausgangsmaterial für elektronische Anwendungen. Der Fokus der Arbeiten liegt auf kolloidalen Nanokristallen aus infrarot absorbierenden Blei-Salzen, aus Metall-Halid Perovskiten und aus organischen Pigmenten. Studiert werden einerseits wichtige fundamentale Eigenschaften dieser Materialien, wie deren Dotierbarkeit zur Kontrolle der Ladungsträgerkonzentration, deren elektrisches Verhalten auf flexiblen Substraten, oder auch deren Druckbarkeit, und andererseits auch deren Anwendbarkeit in energierelevanten Prozessen wie der photokatalytischen Herstellung von Treibstoffen, wie H₂O₂ oder Wasserstoff. Als neuartige Anwendung wurden Nano-Architekturen aus organischen Pigmenten auch für die Photo-stimulation elektrischer Signale in menschlichen Zellen aufgezeigt.

1 Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien

1.1 Lösungsprozessierte Materialien zur Photon-Detektion

Die Professur beschäftigt sich mit lösungsprozessierten Materialien für die Entwicklung von Photodetektoren für den infraroten Spektralbereich als auch für den Röntgenbereich. Dazu werden zwei Materialsysteme synthetisiert: kolloidale Nanokristalle aus Bleisalzen und Metall-Halid-Perovskite. Letztlich wurden diese Materialsysteme auch kombiniert, und PbS Nanokristalle mit epitaktischen Metall-Halid Schalen umhüllt. Diese kombinierten Nanokristalle in Filmen abgeschieden ergeben sensitive Photoleitungsdetektoren, mit schnellen Ansprechzeiten und hohen Verhältnissen zwischen Strom unter Beleuchtung und Dunkelstrom. Diese Arbeiten werden zur Zeit durch Bemühungen ergänzt, die Lichtempfindlichkeit der Detektoren zu längeren Wellenlängen hin zu erweitern, die Langzeitstabilität der Detektoren zu verbessern, und die Druckbarkeit der Nanokristalle zu gewährleisten (Abbildung 1). Besonders interessant wäre natürlich die Realisierung von gedruckten Photodetektoren auf dünnen und flexiblen Substraten. In diesem Zusammenhang wurden in einer Zusammenarbeit mit der Universität Groningen (Prof. M.A. Loi) erste Fundamentale Untersuchungen des Stromtransportes in PbS Nanokristalle-Transistoren auf biegsamen Substraten durchgeführt. Verbiegen der Substrate komprimiert oder dehnt die aufgetragenen Photoleitungsschichten aus Nanokristallen und ändert somit deren Leitfähigkeit. Während Kompression zu wesentlichen Verbesserungen der Leitfähigkeiten führt (45% Zunahme bei einer Verspannung von 2%) sinkt der Stromtransport merklich bei Dehnungen. Außerdem wurden Hinweise gefunden, dass auch die Dichte der elektronischen Defektzustände mit der aufgebrachtten Verspannung variiert werden. Diese fundamentalen Einblicke in die Eigenschaften von Nanokristallfilmen, eröffnen die Möglichkeit aus Nanokristallfilmen Dehnungsmessstreifen zu entwickeln, schränken aber die Möglichkeiten ein, Nanokristallfilme zu flexiblen Photodetektoren zu verarbeiten. Mit der gleichen Arbeitsgruppe (Prof. M.A. Loi) wurde ein weiterer Technologie für PbS Nanokristallfilme entwickelt, und zwar deren Dotierung. Während p-typ PbS Nanokristallfilme schon bisher leicht hergestellt werden konnten, fehlte vor allem die Möglichkeit der n-Dotierung. Dazu wurde ein organisches Molekül verwendet, welches die Nanokristalle über Elektronentransferprozesse dotiert. Untersucht wurden Transistorstrukturen, die nach Eintauchen in eine Lösung mit Dotiermolekülen eine verringerten

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

Kanalwiderstand zeigen, kombiniert mit einer erhöhten Elektronenmobilität. Beides deutet auf eine erfolgreiche Dotierung der Nanokristallschicht, was eine entscheidende Grundlage für die Weiterentwicklung der Nanokristall-Elektronik bedeutet, zumal viele Bauelemente auf bipolaren Eigenschaften von Halbleitern beruhen. Als weitere fundamentale Eigenschaft der Nanokristallfilme wurden die Verteilungen von Defektzuständen untersucht. Wiederum in Transistorbauelementen, in denen unterschiedliche Dielektrika unter den Gate Kontakten verwendet worden sind, wurde gezeigt, dass Materialien mit hohen dielektrischen Zahlen zu einer Erhöhung der Defektzustände im Nanokristall-Kanal führen, als auch zu einer energetischen Verbreiterung dieser Zustände. Interessanterweise hat diese Zunahme der Defektzustände aber keinen Effekt auf die maximal erreichbare Mobilität in den Transistoren, was die Möglichkeit eröffnet, Nanokristallbauelemente auch bei niedrigeren Spannungen zu betreiben. In Bezug auf Röntgendetektoren hat die Gruppe 2017 zu einer Arbeit beigetragen in der Wafer aus Metall-Halid Perovskiten demonstriert worden sind. Diese Wafer werden aus Pulver gepresst, wobei die Pulver durch Kristallisation in einem Nichtlösungsmittel gewonnen werden. Diese Perovskit-Wafer zeigen unter Beleuchtung mit Röntgenstrahlung ähnlich hohe Sensitivitäten wie z.B. Detektoren aus Cadmium Tellurit Einkristallen, die mit wesentlich aufwendigeren und deshalb teuren Techniken hergestellt werden.

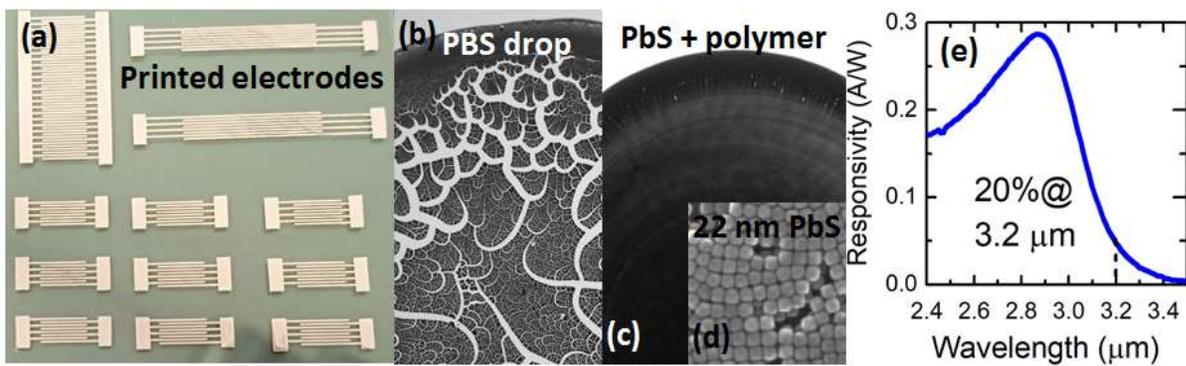


Abbildung 1: (a) Gedruckte Silberelektroden als Kontakte für Infrarotdetektoren basierend auf kolloidalen PbS Nanokristallen. (b) Ein Tropfen aus PbS Nanokristallen nach dem Trocknen auf Glas Substrat zeigt ein bizarres Muster aus Rissen, die jeglichen Stromtransport durch eine solche Schicht unterdrücken. (c) Eine geringfügige Zugabe eines Polymers zu den Nanokristallen verhindert die Bildung der Risse. (d) Elektronenmikroskopische Aufnahme der PbS Nanokristalle. (e) Die Nanokristallfilme zeigen eine Photosensitivität bis zu Wellenlängen im mittleren Infraroten Spektralbereich. (Copyright i-MEET, FAU)

1.2 Organische Pigmenthalbleiter

Das zweite Halbleitersystem das in der Gruppe der W2 Professur bearbeitet wird, sind organischen Pigmenthalbleiter. Im vorangegangenen Jahr wurde gezeigt, dass solche organischen Pigmenthalbleiter für die elektro-photokatalytische Generation von hochenergetischen Treibstoffen eingesetzt werden kann. Gezeigt wurde die Reduktion von Sauerstoff, der in Wasser gelöst ist, zu Wasserstoffperoxid. Aufbauend auf diese Arbeit wurden in diesem Projektjahr in Zusammenarbeit mit der Linköping Universität (Gruppe von E. D. Glowacki) Nanokristalle aus organischen Pigmenten synthetisiert, die in Wasser dispergiert unter Sonneneinstrahlung das gleiche zustande bringen, ohne dass dabei eine zusätzliche elektrische Spannung angelegt werden muss. Stattdessen werden organische Opfer-Substanzen (Donatoren) verwendet die oxidiert werden. Mit Nanopartikeln aus Epindolidione (ein gelbes Pigment) wurden auf photokatalytischem Weg die höchsten jemals berichteten H₂O₂ Gleichgewichtskonzentrationen erzielt. Motiviert durch diese Resultate wurden in Zusammenarbeit mit dem Nagoya Institut of Technology (Gruppe von S. Kawasaki) versucht, auf elektro photo-chemischem Wege auch Wasser zu Wasserstoff zu reduzieren. Hier gibt es erste Ergebnisse, die zeigen, dass dies auch möglich ist, wobei eine genaue Quantifizierung der Effizienzen und Generationsraten noch aussteht. Bemerkenswert ist, dass diese Reduktion mit geeigneter Wahl der Gegenelektrode auch ohne angelegte Spannung erfolgt.

Die Reduktion von Wasser zu Wasserstoff erfolgt über Transfer der photoangeregten Ladungsträger von den organischen Halbleitern über deren Oberfläche zu den Wassermolekülen. Um diesen Transfer zu maximieren wurden von uns Nanokristall-Architekturen aus organischen Pigmenthalbleitern synthetisiert, welche speziell große Oberflächen aufweisen. Diese ergeben sich zum Beispiel, wenn die Nanokristall-Architekturen aus Nanodrähten bestehen die sich

Gruppieren und schließlich die Form eines Igels aufweisen. Mit diesen Nanokristall-Architekturen wurde in Zusammenarbeit mit der Johannes Kepler Universität Linz und der Linköping Universität ein besonderes Forschungs-Highlight erzielt. Diese Nanokristall-Architekturen wurden benutzt um menschliche embrionale Leberzellen, die auf den Nanokristall-Architekturen kultiviert worden sind (Abbildung 2), mit Licht zu stimulieren. Einzelne Leberzellen reagieren auf Photo-Stimulation nur dann, wenn sie einen engen Kontakt zu den Nanoarchitekturen aufweisen. Die Zellen selbst sind für das anregende Licht transparent, während in den Nano-Architekturen Ladungsträger angeregt werden. Diese angeregten Ladungsträger induzieren elektrische Signale in den aufgewachsenen Zellen, aufgrund von Ionenströmen durch die Zellmembrane. Solche Ionenströme werden entweder thermisch getriebenen, aufgrund einer lokalen Aufheizung der Zellen über die Nanokristall-Architekturen, oder kapazitiv induziert, aufgrund von oberflächennahen photoinduzierter Ladungen. Diese beiden Arten von Ionenströmen konnten an einzelnen Zellen aufgrund ihrer Dynamik unterschieden werden. Wichtig ist dabei, dass die Photo-Stimulationen der Zellen unter physiologischen Bedingungen erzielt werden konnten. Dies ist nicht nur von fundamentalen Interesse sondern könnte auch für die Entwicklung einer künstlichen Retina eingesetzt werden, die erblindeten Patienten eingesetzt werden könnte. Eine große Bedeutung für diese Photo-Stimulation spielt dabei die Grenzfläche zwischen den Zellen und den Nanokristall-Architekturen, da jeglicher Spalt zwischen den Strukturen dabei zu einer Verringerung der induzierten Signale führen würde. Besonders Vorteilhaft in diesem Zusammenhang ist, dass die organischen Nanostrukturen eine Oberfläche aufweisen, an die die Zellen gerne aufwachsen, und dass die Nanodrähte der Architekturen mechanisch flexibel sind und sich deshalb an die Oberfläche der Zellen anpassen können.

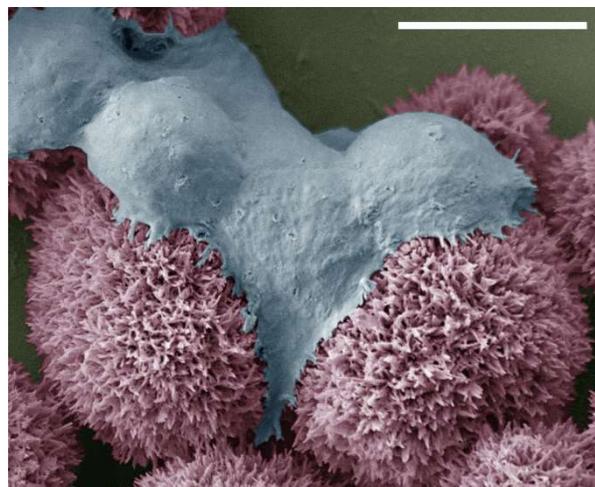


Abbildung 2: Nanokristall-Architekturen (rosa) überwachsen mit humanen embryonalen Leberzellen (hellblau). Die Nanoarchitekturen ermöglichen eine Photostimulation der aufgewachsenen Zellen. Skala (10 μm) (Copyright i-MEET, FAU)

2 Schlussworte

Die lösungsprozessierten Halbleitermaterialien die in der Gruppe synthetisiert und untersucht werden inkludieren Nanokristalle für Anwendungen in elektro-optischen Bauteilen und der Photokatalyse. Altbekannten Materialien wie organischen Pigmenten werden neue Funktionalitäten eröffnet, in dem die Materialien in neuartigen Architekturen synthetisiert werden und in dem neuartige Anwendungen getestet werden, die als Beispiel auch Bioelektronische Anwendungen inkludieren.

3 Vorträge & Poster 2017

- [1] W. Heiss, Hydrogen Bonded Organic Pigment Colloidal Nanocrystals, *Nanoscience with Nanocrystals*, 2017
- [2] AmirAbbas YousefiAmin, Fully Inkjet-Printed Nanocrystal Infrared Photodetectors, , *Nanoscience with Nanocrystals*, 2017

4 Veröffentlichungen 2017

- [1] M. Sytnyk, M. Jakesova, M. Litvinukova, O. Mashkov, D. Kriegner, J. Stangl, J. Nebesarova, F. W. Fecher, W. Schofberger, N.S. Sariciftci, R. Schindl, W. Heiss, E. D. Glowacki, Cellular interfaces with hydrogen-bonded organic semiconductor hierarchical nanocrystals, *Nature Communications* 8, 91, 2017
- [2] S. Shrestha, R. Fischer, G.J. Matt, P. Feldner, T. Michel, A. Osvet, I. Levchuk, B. Merle, S. Golkar, H.W. Chen, S.F. Tedde, O. Schmidt, R. Hock, M. Ruhrig, M. Goken, W. Heiss, G. Anton, C.J. Brabec, High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers, *Nature Photonics* 11, 436, 2017
- [3] M.I. Nugraha, S. Kumagai, S. Watanabe, M. Sytnyk, W. Heiss, M.A. Loi, J. Takeya, Enabling Ambipolar to Heavy n-Type Transport in PbS Quantum Dot Solids through Doping with Organic Molecules, *ACS Applied Materials&Interfaces* 9, 18039-18045, 2017
- [4] M.I. Nugraha, R. Häusermann, S. Watanabe, H. Matsui, M. Sytnyk, W. Heiss, J. Takeya, M. A. Loi, Broadening of Distribution of Trap States in PbS Quantum Dot Field-Effect Transistors with High-k Dielectrics, *ACS Applied Materials&Interfaces* 9, 4719-4724, 2017
- [5] M. Sytnyk, S. Yakunin, W. Schofberger, R.T. Lechner, M. Burian, L. Ludescher, N.A. Killilea, A.A. YousefiAmin, D. Kriegner, J. Stangl, H. Groiss, W. Heiss, Quasi-epitaxial Metal-Halide Perovskite Ligand Shells on PbS Nanocrystals, *ACS Nano* 11, 1246-1256 (2017)
- [6] M. Richter, T. Heumüller, G. J. Matt, W. Heiss, C. J. Brabec, Carbon Photodetectors: The Versatility of Carbon Allotropes, *Advanced Energy Materials* 7, 1601574, 2017
- [7] M. I. Nugraha, H. Matsui, S. Watanabe, T. Kubo, R. Häusermann, S. Z. Bisri, M. Sytnyk, W. Heiss, M. A. Loi, and J. Takeya, Strain-Modulated Charge Transport in Flexible PbS Nanocrystal Field-Effect Transistors, *Adv. Electron. Mater.* 3, 1600360, 2017

FORSCHUNGSBEREICH

Netze



Sprecher des Forschungsbereichs

Prof. Dr. Matthias Luther

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

E-Mail
matthias.luther@fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 67540

Web
www.encn.de

Netze

Projektbericht 2017

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).

1 IEEE PESS 2017 - Konferenz

Am 27. und 28. Juni 2017 gab es am Energie Campus Nürnberg einen detaillierten Einblick in die Forschung auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik: Studierende von Universitäten und technischen Hochschulen aus ganz Deutschland präsentierten vor Experten aus Wissenschaft und Industrie ihre Bachelor- und Masterarbeiten. Zentrales Thema war natürlich die Energiewende.

Neben klassischen Themen wie z.B. Weiterentwicklungen in der Hochspannungstechnik standen die Integration von Erneuerbaren Energien und der damit verbundene Umbau der elektrischen Netze im Vordergrund der Beiträge und Diskussionen.

Die Sitzungen der einzelnen Fachforen wurden von Experten aus der Industrie geleitet. Als Konferenzsprache wurde bewusst Englisch gewählt und wie es auf einer internationalen Konferenz üblich ist, wurde für die besten Beiträge ausgezeichnet und mit einem Preisgeld von 400 € für das beste Paper und jeweils 300 € für das beste Poster und den besten Vortrag belohnt.

Als Preisträger für das beste Paper wurde Herr Pierre Kehl von der Universität des Saarlandes für die Arbeit „Heterogeneous Modeling: A Need to Model Future Energy Systems“ ausgezeichnet. In der Urteilsbegründung des VDE Young Energy Nets wird besonders hervorgehoben, dass das Paper aufzeigt, wie durch Heterogenous Modelling die steigende Interaktion verschiedener beteiligter Systeme und die Komplexität der zukünftigen Energiesysteme sinnvoll abgebildet und analysiert werden kann. Für den besten Vortrag wurde Herr Tim Streubel von der Universität Stuttgart ausgezeichnet und für das beste Poster Herr Zheng Liu von der TU Ilmenau. Titel der honorierten Arbeiten sind „Bad Data Detection and Identification in Distribution Power Systems“ und „Simulation and Comparison of Inverter Models in Inverter-dominated Power Distribution Grid“.

Auch das Rahmenprogramm konnte sich sehen lassen und stand dem einer großen Konferenz in nichts nach. Nach einem Empfang auf der Nürnberger Burg am Anreisetag konnte während des „Conference Dinners“ in der Nürnberger Altstadt weiter diskutiert und so mancher neue Kontakt geknüpft werden. Zum Abschluss der Konferenz gab es noch einmal

Technik „zum Anfassen“. Eine Besichtigung des Transformatorenwerks der Siemens AG lieferte einen faszinierenden Einblick in die Fertigung und Prüfung von Höchstspannungstransformatoren.

Die Beiträge zur Konferenz waren auf einem sehr hohen Niveau. Es wurde nicht nur über die Energiewende geredet, sondern auch ein tiefer Einblick in laufende Forschungsarbeiten gegeben.



Abbildung 1: (Von links: Professor Dr.-Ing. Matthias Luther (FAU Erlangen-Nürnberg), Dr.-Ing. Gert Mehlmann (FAU Erlangen-Nürnberg), Herr Pierre Kehl (Universität des Saarlandes), Herr Zheng Liu (TU Ilmenau), Herr Tim Streubel (Universität Stuttgart), Herr Andreas Lukaschik (VDE Young Energy Net)

2 NETZ:KRAFT

2.1 Einleitung und Untersuchungsgegenstand

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes NETZ:KRAFT werden neue Konzepte für den Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung zukünftiger Kraftwerksstrukturen entwickelt. Das Konsortium von NETZ:KRAFT setzt sich aus insgesamt 20 Partnern zusammen, zu denen Netzbetreiber, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen zählen. Das Projekt gehört zur Forschungsinitiative „Stromnetze“ der Bundesregierung, welche durch das BMWi und das BMBF gefördert wird.

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.

Im Forschungsvorhaben NETZ:KRAFT arbeitet der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme an der Analyse, Bewertung und Optimierung von Schutzsystemen vor, während und nach dem Netzwiederaufbau. Dabei soll das Elektroenergiesystem, bestehend aus Netz und Schutz, stets als systemtechnische Einheit betrachtet werden und automatisiert, sowohl hinsichtlich seiner Koordination und Gerätetechnik optimiert werden, als auch in seiner Funktionalität bewertet werden.

2.2 Zusammenfassung der erfolgten Arbeiten und Ergebnisse

Vor dem Hintergrund dieses Projektes leitet sich, der zentrale Impuls für die Konstruktion eines Schutzgeräteversuchsstandes auf Basis von Digitalschutzeinrichtungen neuester Generation ab (siehe Abbildung 2). Dieser Ansatz erfordert die Kombination mit einem echtzeitfähigen Modellsystem, welches elektrische Energieversorgungsstrukturen nachbildet. Am Kraftwerks- und Netzmodell des Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme wird der Betriebsvorgang eines Netzwiederaufbaus oder eines Kurzschlussfalles simuliert, so können die in Echtzeit verfügbaren Strom- und Spannungsverläufe an die sechs SIPROTEC 5 Schutzgeräte des Schutzgeräteversuchsstandes weitergeleitet werden. Dabei erhält jedes Schutzgerät nur die Signale des ihm zugeordneten Messpunktes. Die Aufgabe der Schutzgeräte besteht nun darin, anhand der Strom- und Spannungsverläufe, im Hinblick auf ihre Konfiguration und Parametrierung, eine Entscheidung hinsichtlich der Ansteuerung ihres zugeordneten (in der Simulation nachgebildeten) Leistungsschalters zu treffen.

Die Kombination aus Kraftwerks- und Netzmodell und Schutzgerätstand ermöglicht somit die Analyse, Bewertung und Optimierung der Schutzsysteme. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit, hardwarebasierten Schutzgeräte in eine echtzeitfähige Simulationsumgebung einzubinden, einen enormen Mehrwert gegenüber einer rein softwarebasierten Nachbildung. Eine simulationstechnische Modellierung der Schutzgeräte ist für eine fundierte Untersuchung des Systemverhaltens während des Netzwiederaufbaus nicht ausreichend. Gründe hierfür sind die Komplexität der verwendeten Schutzalgorithmen aktueller Geräte sowie deren Geheimhaltung von Seiten der Schutzsystemhersteller. Der wesentliche Grund, die Versuchskonzepte in der oben beschriebenen Form durchzuführen, besteht daher in der Verlässlichkeit der Aussagen, welche sich hinsichtlich des realitätsgetreuen Verhaltens der hardwarebasierten Schutzgeräte ableiten lassen. Gerade dieser Aspekt stellt vor dem Hintergrund, dass Schutzsysteme neben der Wahrung der Integrität des Energieversorgungssystems und der Abwendung großer Sachschäden auch dem Schutz von Menschenleben dienen, ein essentielles Kriterium der angestrebten Untersuchungen dar.



Abbildung 2: Schutzgerätstand auf Basis von Digitalschutzgeräten aktuellster Generation, im Hintergrund Kraftwerks- und Netzmodell

2.3 Vorhandenes Personal im Projekt

Die Projektleitung für die Tätigkeiten in NETZ:KRAFT am EnCN untersteht Professor Dr.-Ing. Johann Jäger. Die Projektbearbeitung erfolgt durch Herrn Michael Jaworski.

2.4 Ausblick auf weitere Tätigkeiten

Im Rahmen der Untersuchungen, welche im 4. Quartal des Jahres 2017 unter Verwendung des erweiterten Schutzgeräteversuchsstandes durchgeführt wurden, gelang der laborbasierte Nachweis einer speziellen Form der Distanzschutzüberfunktion in Kombination mit Netzpendelungen. In diesem Kontext wird nun der gezielte Einsatz von Pendelsperren weiter untersucht um Identifikationskriterien herauszuarbeiten, anhand denen die Vor- und Nachteile derartiger Blockierungsmechanismen mit Bezug auf ihren Installationsort abgewogen werden können.

3 SWARM – Storage With Amply Redundant Megawatt

3.1 Einleitung und Untersuchungsgegenstand

In den letzten 15 Jahren ist die installierte Leistung erneuerbarer Energieanlagen (EEA) – vorrangig Photovoltaik- (PV) und Windenergieanlagen – in Deutschland auf ca. 90 GW angestiegen. Ende 2017 betrug die installierte Leistung von PV-Anlagen in Deutschland ca. 45 GW, wobei die installierte Solarleistung in Bayern mehr als ein Viertel der gesamten PV-Leistung in Deutschland betrug.

Der enorme Anstieg der Leistung aus EEA erfordert erweiterte Maßnahmen in der Netzplanung und der Netzbetriebsführung von Übertragungs- und Verteilnetzen. Darüber hinaus ergibt sich durch die Integration von Energiespeichersystemen zukünftig die Möglichkeit, Systemdienstleistungen – wie z.B. Frequenzregelung, Spannungsregelung und Schwarzstartfähigkeit – zu erbringen.

Im Hinblick auf die Bereitstellung von gespeicherter Energie wird zwischen Energiespeichern als Kurzzeitspeicher, mittelfristigen Energiespeichern und Langzeitspeichern unterschieden. Batteriespeichersysteme (BSS) gehören zur Kategorie der mittelfristigen Energiespeicher. Nach dem heutigen Stand der Technik können große (im MW-Bereich) und kleine (im kW-Bereich) vernetzte BSS auf Lithium-Ionen-Basis zur Frequenzhaltung beitragen. Ferner besteht für virtuelle Großspeicher ebenfalls die Möglichkeit, am Stromhandel des Intraday-Markts teilzunehmen.

Zwischen Februar 2014 und Juli 2015 hat der Nürnberger Energieversorger N-ERGIE AG gemeinsam mit einem Batteriespeicherhersteller Caterva GmbH das Pilotprojekt „SWARM¹“ initiiert. Bei diesem Pilotprojekt handelte es sich um die Installation bzw. Vernetzung von 65 BSS über Mobilfunk zu einem virtuellen Großspeicher mit einer Nennleistung mehr als 1 MW. Die BSS sind in die Niederspannungsebene im Netzgebiet der Main-Donau Netzgesellschaft (MDN) mbH integriert, welche ein Tochterunternehmen der N-ERGIE AG ist. Das Netzgebiet der MDN umfasst derzeit etwa 50.000 EEA mit einer installierten Leistung von über 2,2 GW.

Die Nennleistung und -kapazität der BSS betragen 20 kW bzw. 21 kWh. Die Zielgruppe für die Installation von BSS dieser Baugröße sind vorrangig Privatkunden mit Solaranlagen, die deutlich mehr als die durchschnittlich üblichen 30 % ihres selbst erzeugten Solarstroms verbrauchen möchten. Durch die von Caterva entwickelten BSS ist eine 60- bis 80-prozentige Nutzung und damit eine hohe Deckung des individuellen Strombedarfs aus Eigenerzeugung möglich. Durch die Vernetzung wurde der Speicherverbund im Sommer 2015 für die Bereitstellung von Primärregelleistung (PRL) von der TenneT TSO GmbH präqualifiziert.

Das vom Freistaat Bayern, in der ersten Förderperiode des EnCN, geförderte Projekt SWARM ist das erste Vorhaben in Deutschland zur Erbringung von PRL. Die Überwachung und Steuerung der einzelnen BSS erfolgt durch die Leitwarte der N-ERGIE und der Caterva.

Im Auftrag der N-ERGIE AG haben drei Lehrstühle der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg das Projekt SWARM von 2015 bis 2017 wissenschaftlich begleitet. Seitens der FAU wurde das Projekt vom Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme koordiniert.

Im Zuge des Forschungsprojekts waren schwerpunktmäßig die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

¹ Storage With Amply Redundant Megawatt

- Welchen Einfluss haben BSS auf das Betriebsverhalten von Verteilnetzen im stationären Zustand sowie auf das Frequenzregelverhalten des Übertragungsnetzes? (Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme)
- Unter welchen Bedingungen investieren Privathaushalte in innovative Stromspeicher? (Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre insbesondere Wirtschaftstheorie)
- Welcher ökonomische Nutzen ergibt sich aus Sicht des Netzbetreibers bzw. der Privathaushalte? (Lehrstuhl für Informatik 7)

3.2 Zusammenfassung der Untersuchung und Ergebnisse

Die Nutzung von BSS ist für Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreiber und Betreiber von Photovoltaikanlagen gleichermaßen von großem Interesse. Die Betreiber von PV-Anlagen fokussieren sich auf die Erhöhung des Eigenverbrauchs des erzeugten Solarstroms, wohingegen für die Verteilnetzbetreiber netztechnische Aspekte und die Bereitstellung von Primärregelleistung im Vordergrund stehen. Durch die Blindleistungsregelung von PV-Anlagen ist es weiterhin möglich, die Spannungsregelung in Verteilnetzen zu beeinflussen.

In den vergangenen Jahren ist die installierte Leistung von BSS kontinuierlich gestiegen. Dieser Trend wird im Laufe der kommenden Jahre weiterhin bestehen bleiben. Im Rahmen des Projekts SWARM wurden am Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme Analysen in zwei synthetischen Übertragungsnetzmodellen und zwei von der MDN zur Verfügung gestellten realen Verteilnetzmodellen durchgeführt.

Die Modellierung der Speichersysteme in einem aus 40 Knoten bestehenden Übertragungsnetzmodell ohne Berücksichtigung der Regelleistung aus externen Netzen bestätigt den positiven Einfluss der BSS auf das Frequenzverhalten. In den Simulationen mit Lastsprüngen können sowohl die dynamische als auch die stationäre Frequenzabweichung mit steigender Speichergröße deutlich reduziert werden. Angesichts der Speicherintegration verringert sich die dynamische Frequenzabweichung um bis zu 15 %, bei Vernachlässigung des Frequenztotbands in BSS sogar um bis zu 18 %. Die Analysen auf Basis der erstellten Lastprofile für 300 s zeigen vergleichbare Ergebnisse. Die Häufigkeit der Frequenzwerte bei dem Nennwert erhöht sich im Falle der Vernachlässigung des Totbands. Die Untersuchungen hinsichtlich der Erzeugungsszenarien ergeben, dass BSS in zukünftigen Energiesystemen mit verminderter Regelreserve und reduzierter Systemträgheit einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Frequenzqualität leisten können (siehe Abbildung 3). Bei Betrachtung des Netzmodells als Bestandteil des kontinentaleuropäischen Verbundnetzes ist der Effekt der Verbundspeicher auf die Frequenzregelung nicht signifikant. Dies beruht auf der Tatsache, dass das Verhältnis der installierten Leistung von Speichern zur Primärregelleistungsreserve extrem gering ist.

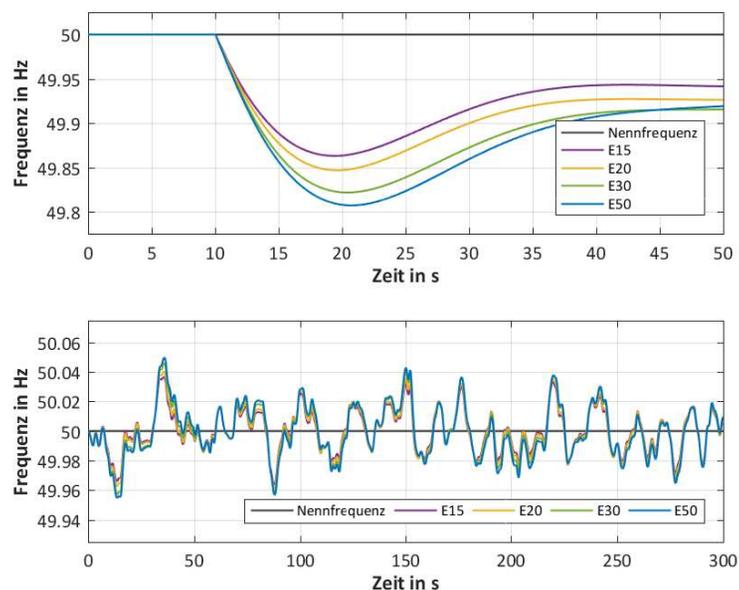


Abbildung 3: Frequenzverläufe in den Erzeugungsszenarien nach einem Lastsprung (o.) bzw. hinsichtlich Lastprofile (u.)

In einem zweiten Übertragungsnetzmodell auf der Grundlage eines IEEE-Testnetzes wurden vergleichsweise größere Anteile der installierten Leistung der BSS im Verhältnis zu den Generatoren bzw. der modellierten Primärregelleistungsreserve berücksichtigt. Dies entspricht einem zukünftig eher optimistischen Szenario des Speicherzubaues in Kontinentaleuropa. Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass die zunehmende installierte Leistung von BSS eine Leistungsfähigkeitserhöhung hinsichtlich des max. dynamischen Frequenzabfalls von bis zu 70 % aufweist. Ferner wird die stationäre Frequenz nach dem Lastsprung schneller (etwa mit einem Zeitfaktor von 0,8) erreicht.

Die Ergebnisse der Lastflussberechnung in einem Verteilnetz bestehend aus sechs Ortsnetzen zeigen, dass die Knotenspannungen weder im Einspeise- noch im Lastfall die zuverlässigen Grenzen überschreiten. Hingegen erreichen die Auslastungen durch Speicherintegration im Einspeisefall Werte über 80 % für die Ortsnetztransformatoren und über 100 % für die Kabel in den Ortsnetzen. Im Lastfall sind dagegen die maximalen Betriebsmittelauslastungen geringer als im Einspeisefall. Ferner lässt sich aus den Simulationsergebnissen folgern, dass mit zunehmender Speicherzahl die Auslastungen der Betriebsmittel ebenfalls steigen. Für das Netzgebiet der MDN ergeben sich – lediglich im Falle einer lokalen Ballung – geringfügige Auswirkungen auf die Auslastung von Betriebsmitteln, die sich jedoch auf die Niederspannungsebene beschränken.

Aus den Lastflussberechnungen in einem Mittelspannungsring mit neun Ortsnetzen für das Gesamtjahr lässt sich erkennen, dass weder eine unzulässige Auslastung von Betriebsmitteln noch eine Verletzung der vorgeschriebenen Spannungsgrenzen in den betrachteten Szenarien und Untervarianten aufgetreten ist. Aufgrund der geringen Auswirkung durch den Speicherzubau wird das Netz weder in der MS-Ebene noch in der NS-Ebene negativ beeinflusst. Somit stellen BSS in dem modellierten Netz keine Gefährdung für den sicheren Netzbetrieb dar. Darüber hinaus trägt die Integration von BSS zur Verbesserung der Spannungsqualität und zur Senkung der Betriebsmittelbelastung bei. Mithilfe einer Spannungs-Blindleistungsregelung durch die PV- und BSS-Umrichter kann sich dieser positive Effekt verstärken. Infolgedessen ist der Einsatz von 50 BSS in dem analysierten Netz aus netztechnischer Sicht unbedenklich und als sinnvoll zu bewerten. Aus den Häufigkeitsverteilungen bezüglich der Knotenspannungen und Betriebsmittelauslastungen geht zudem hervor, dass die betrachteten Netze robust genug gegenüber einer höheren Speicherdurchdringung sind.

3.3 Vorhandenes Personal im Projekt

Die vom Lehrstuhl für Elektrische Energiesystem am EnCN durchgeführten Arbeiten unterstehen Professor Dr.-Ing. Matthias Luther. Die Projektbearbeitung erfolgt durch Herrn Kishan Veerashekar.

3.4 Ausblick und weitere Tätigkeiten

Für weiterführende Untersuchungen zum Primärregelverhalten im Übertragungsnetz ist eine detailliertere Netzmodellierung erforderlich. Hierbei ist die Betrachtung einzelner Regelzonen oder des gesamten deutschen Übertragungsnetzes möglich. Somit kann einerseits der Einfluss des Netzes als Teil des kontinentaleuropäischen Verbunds besser untersucht werden. Andererseits können auch wesentlich größerer Speichersysteme implementiert und deren Auswirkungen auf das Frequenzverhalten analysiert werden. Des Weiteren kann die Analyse unterschiedlicher Betriebspunkte Bestandteil weiterer Untersuchungen sein. Hierbei können z.B. Schwach- und Starklastfälle sowie besondere Betriebspunkte bzgl. geringer Systemträgheit betrachtet werden. Ebenso sind Simulationen mit sehr eng bemessenen Regelreserven oder unterschiedlichen Systemstörungen denkbar.

Für die Weiterführung der Analysen im Verteilnetz sollte die Anzahl der zu untersuchenden Ortsnetze deutlich erhöht werden, um die hier gewonnenen Erkenntnisse für die Mittel- und Niederspannungsnetze der MDN entsprechend abzusichern. Ferner ist in den vorliegenden Untersuchungen die Integration der BSS nur statisch – d.h. ohne die Berücksichtigung einer des Zubaues von Photovoltaikanlagen betrachtet worden. Beim Zubau zusätzlicher PV-Anlagen wird zukünftig auch der Zubau von BSS steigen, womit deren Einfluss auf die Netze wächst. Mit einer zunehmenden Speicherdurchdringung sind absehbar auch Einflüsse auf den Betrieb und die Netzentwicklung des Mittel- und Hochspannungsnetzes der MDN zu erwarten.

ees

Energy Efficient Systems

ENGINE



4 ENGiNe – das hybride Energiespeichernetz am EnCN

4.1 Einleitung und Untersuchungsgegenstand

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.

Derzeit entwickelt die Arbeitsgruppe das hybride Energiespeichernetz *ENGiNe* (EES NanoGrid Nürnberg). *ENGiNe* soll als Demonstrationsanlage auf dem Gebiet der Speicherforschung und Netzintegration regenerativer Energien dienen. Der schematische Aufbau der Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt.

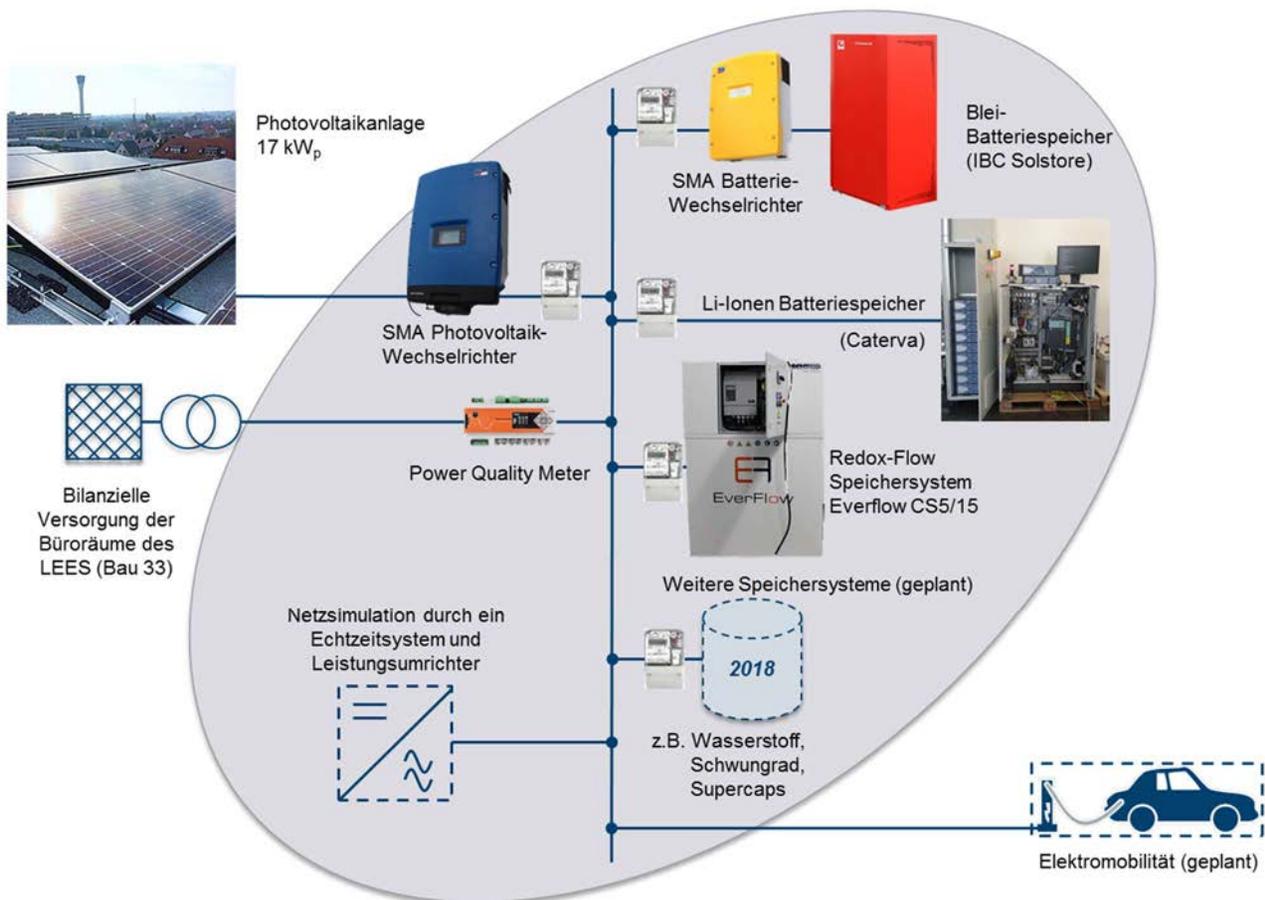


Abbildung 4: ENGiNe - Schematischer Aufbau

Mit dem Projekt wird der Aufbau einer Versuchsanlage verfolgt, welche alle Bereiche einer dezentralen regenerativen Energieversorgung in der Niederspannung integriert. 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.

Anwendungsbereiche und Forschungsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes ergeben sich als Versuchsanlage bei der Untersuchung der Integration regenerativer Energiesysteme und Speicher im Niederspannungsnetz sowie bei der Untersuchung der Interoperabilität unterschiedlicher Speichertypen und der Optimierung von Ladestrategien.

Zukünftig soll auch ein Echtzeitsimulator als steuerbare Last zur Simulation beliebiger Netzzustände integriert werden, welche im realen Netz nur selten und unvorhersehbar eintreten (z.B. Blackout). Insbesondere soll das Speichernetz auch in der Lage sein, umfangreiche Systemdienstleistungen (beispielsweise Regelenergie) auf Verteilnetzebene

bereitzustellen. Da die Netzbetreiber eine direkte Netzeinspeisung nicht ohne weiteres gestatten, können die Untersuchungen mit einem synthetischen Netz durchgeführt werden, welches zudem erlaubt, perspektivische Systemstrukturen zu simulieren. Als Schnittstelle zwischen Simulation und Hardware dient ein hochdynamischer, bidirektionaler Leistungsumrichter.

4.2 Zusammenfassung der erfolgten Arbeiten und Ergebnisse

Das hybride Energiespeichernetz *ENGiNe* befindet sich derzeit in der Installations- und Inbetriebnahme-Phase. Abbildung 5 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 6 dargestellt ist, sowie ein blei- und ein lithumbasiertes Batteriespeichersystem und eine Redox-Flow-Batterie. Eine Übersicht über die technischen Daten der Speichersysteme zeigt Tabelle 1. Als sichere Betriebsumgebung für die Batteriespeicher wurde eigens ein Brandschutzcontainer angeschafft (siehe Abbildung 7).



Abbildung 5: Zeithorizont des Projektes *ENGiNe*



Abbildung 6: Photovoltaikanlage



Abbildung 7: Brandschutzcontainer

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 lithumbasierten Systemen ist bei stationären Speichern von untergeordneter Bedeutung. Nachteile von Bleispeichern 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 vier Blei-Gel-Batterien mit einer Nennleistung von insgesamt 4,6 kW und einer Netto-Speicherkapazität von 4 kWh. Des Weiteren wurde noch 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.

Tabelle 1: Technische Daten der in ENGiNe integrierten Stromspeicher

Speichertechnologie	Blei-Gel	Lithium-Ionen	Vanadium Redox-Flow
Dauer-AC-Leistung	4,6 kVA	20 kVA	4,6 kVA
Nutzbarer Energieinhalt	4 kWh	22 kWh	15 kWh
Anzahl Vollzyklen unter Standardbedingungen	2700	Keine Angabe	> 10 000
Wirkungsgrad AC (Vollzyklus) typisch	> 85 %	> 90 %	> 60 %

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 und wird aktuell für die vorhandenen Betriebszwecke konfiguriert.

4.3 Vorhandenes Personal im Projekt

Die vom Lehrstuhl für Elektrische Energiesystem am EnCN durchgeführten Arbeiten unterstehen Professor Dr.-Ing. Matthias Luther. Die Projektbearbeitung erfolgt durch Herrn Simon Resch, Herrn Klaus Schneider und Herrn Dr.-Ing. Gert Mehlmann.

4.4 Ausblick und weitere Tätigkeiten

Der Beginn des laufenden Forschungsbetriebes wird für Anfang 2018 erwartet. Für den Aufbau und die Weiterentwicklung des Projektes *ENGiNe* wurde von Anfang an auf ein modulares Konzept gesetzt, damit zu jedem Zeitpunkt neue Speicher oder Netzkomponenten in die Anlage integriert werden können.

5 Schlussworte

Der Arbeitsgebiete des Lehrstuhl 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 2017

- [1] M. Jaworski; M. Retterath; J. Jäger. The Proactive Protection System – An Approach to avoid Cascading Line Tripping. APAP, 2017
- [2] M. Jaworski; E. Schischke; J. Jäger. Modelling of the Sympathetic Inrush Effect and Its Impact on Protection Systems during Power System Restoration. PAC World, 2017

- [3] K. Veerashekar; S. Weiß; M. Luther. Frequency Regulation in Transmission Grids Using Virtually Interconnected Battery Storage Systems. CIGRE Symposium, Dublin, 2017
- [4] K. Veerashekar; C. Mitterreiter; M. Luther. Probabilistic Load-Flow Analyses in Distribution Grids with Battery Storage Systems Providing Frequency Containment Reserve. CIGRE Symposium, Dublin, 2017
- [5] R. German; K. Goetz; V. Grimm; A. Kufner; C. Leepa; M. Luther; S. Mehl; I. Sigert; D. Steber; K. Veerashekar. Virtueller Großspeicher zur Erbringung von Primärregelleistung - Pilotprojekt SWARM. OTTI-Konferenz, Berlin, 2017

FORSCHUNGSBEREICH

Speicher



Sprecher des Forschungsbereichs

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

E-Mail
juergen.karl@fau.de

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 - Speicher mit Systemrelevanz bis 2022

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

Projektbericht 2017

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 GWel
- mit hoher Kapazität, für ca. 10-20 TWh

und damit in systemrelevanten Größenordnungen zu speichern. Entsprechende dieser 3 Speicheraufgaben und -strategien werden in den Teilprojekten Systeme konzipiert und an Prototypenanlage erprobt und demonstriert.

Seit Beginn der 2. Förderphase des ENCN und damit seit Projektstart liegt zunächst ein Fokus der Arbeiten auf der detaillierten Konzeption und numerischen Untersuchung der vorgeschlagenen Systeme. Dies ist in allen Teilprojekten Grundlage für Auslegung und Konstruktion der Anlagen zur experimentellen Analyse, die in den kommenden Jahren im Fokus stehen wird.

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)

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines reversiblen Wärmepumpen / ORC - Prozesses zur Aufwertung und zeitlich verschobenen Rückverstromung von Niedertemperaturabwärme zu Stromspeicherzwecken. Es soll dazu die apparative Kombination beider Technologien mit thermodynamisch und wirtschaftlich optimale Anlagenkonfigurationen und Arbeitsfluiden identifiziert werden. Die Technologie soll mit einem Niedertemperatur-Speicher für Temperaturen bis 150°C gekoppelt werden. Der automatisierte Betrieb eines reversiblen HP-ORC in technisch relevanter Größenordnung soll erstmals erprobt werden, um auf Grundlage der Projekt-Ergebnisse die vielversprechendsten Anwendungsfelder für eine rasche Markteinführung zu ermitteln.

1.1 Thermodynamische Kreisprozesssimulation

Bernd Schmitt, Lars Zigan, Stefan Will (LTT)

Um bei der Bereitstellung elektrischer Energie auftretende Überschüsse flexibel, kurzfristig und dezentral zu speichern, kann günstig eine Wärmepumpe eingesetzt werden, welche Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau bringt und diese dort einem Energiespeicher zuführt. Im Strombedarfsfall kann durch die Umkehrung des Prozesses in Form eines Organic Rankine Cycle (ORC) die auf hohem Temperaturniveau gespeicherte Energie wieder zurückverstromt werden. Durch die Aufwertung von Niedertemperaturabwärme wird die Effizienz des Prozesses zusätzlich verbessert. Indem die Komponenten sowohl für Belade- als auch Entladevorgänge genutzt werden, können die Investitionskosten der Anlage signifikant reduziert werden.

Zur Erzielung eines optimalen Wirkungsgrades bei der Speicherung der elektrischen Energie (P2P) sind die Gestaltung des Kreisprozesses und die Wahl des Arbeitsfluides von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) detaillierte Simulationsmodelle entwickelt. Diese wurden in Matlab® und Dymola (Abbildung 1) erstellt und mittels Code-to-Code Verifikation auf Korrektheit überprüft. Die erstellten Modelle erlauben es, verschiedenste Systemkonfigurationen zu testen, darunter mögliche Schaltungskonzepte mit ein- oder zweistufiger Anlagenkonzeption, alle von der umfassenden thermodynamischen Stoffdatenbank REFPROP bereitgestellten Reinstoffe sowie sub-, trans- und superkritische Prozessführungen. Daraus ergeben sich über 1250 Varianten. Diese wurden auf ihre allgemeine Eignung geprüft, mittels einer Parametervariation der Randbedingungen optimiert und in enger Zusammenarbeit mit den aktuellen Ergebnissen und Anforderungen des Projektpartners iPAT verfeinert. Der Fokus aktueller Simulationen liegt auf den Arbeitsfluiden Cyclopentan, R365mfc, Novec649 und R1233zd. Diese Gruppe an Fluiden zeigt für verschiedene untersuchte Einsatzszenarien ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten und entspricht den aktuellen Gesetzgebungen bezüglich Global Warming Potential (GWP) und Ozon Depletion Potential (ODP). In einer einstufigen Konfiguration mit interner Wärmeübertragung und der Möglichkeit, per Bypass den internen Wärmeübertrager im ORC-Modus zu umgehen, ist es möglich, die vier ausgewählten Fluide im Experiment zu untersuchen. Die geringere Komplexität und Anzahl der Komponenten stellt hierbei den Vorteil gegenüber einer mehrstufigen Konfiguration dar, die in einigen Fällen einen geringfügig höheren P2P Wirkungsgrad aufweist. Mit der Übergabe der bisherigen Ergebnisse bezüglich der Arbeitsfluide und Schaltungsvarianten an den iPAT konnte der erste Meilenstein im Projekt frühzeitig erfüllt werden.

Ergebnisse aus den thermodynamischen Simulationen flossen zudem in das Arbeitspaket 3 von SP 1.2 (die dynamische Simulation der Energieflüsse und Speicherung der Abwärme von Rechenzentren und der Integration großer Speicher in Nahwärmenetze), des Lehrstuhls für Rechnernetze und Kommunikationssysteme ein. Erfahrungen im Bereich des praktischen Betriebs von ORC-Prozessen des EVT ermöglichten eine frühe realitätsnahe Überprüfung der erstellten Simulationsmodelle.

Durch die Erweiterung der bestehenden Modelle um die Möglichkeit, zeotrope und azeotrope Fluidgemische einzubinden und zu untersuchen, sind weitere Optimierungsmöglichkeiten durch eine effizientere exergetische Nutzung

der vorhandenen Abwärme zu erwarten. Nach Abschluss der stationären Volllastsimulationen werden die Varianten auf ihr stationäres Teillastverhalten hin untersucht.

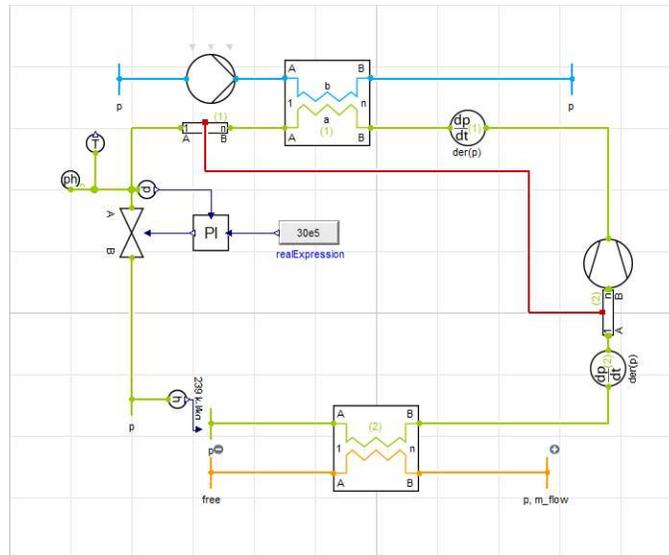


Abbildung 1: Simulationsmodell einer Wärmepumpe mit Regelkreis und interner Wärmeübertragung in Dymola

1.2 Marktrecherche zu den Anlagenkomponenten und Untersuchungen zu Arbeitsfluid-Schmieröl-Paarungen

Daniel Steger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Sowohl im ORC-Prozess, also auch im Wärmepumpen-Prozess stellen die Verdrängermaschine und die Wärmetauscher die zentralen Elemente einer Anlage dar. Aufgrund dessen stand die Marktrecherche zu geeigneten Verdrängermaschinen und die Auslegung der Wärmetauscher im Vordergrund. Für die Vorgabe des Umkehrbetriebs scheint die Bauform der Schraubenmaschine am besten geeignet zu sein. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Auswahl der Maschine von einigen weiteren Parametern abhängt und auf die Festlegung dieser in ähnlichem Maße Einfluss nimmt. So wirken sich beispielsweise die Auswahl des Arbeitsfluides und die Betriebsweise (Temperaturniveaus, Massenstrom, etc.) stark auf das Design der Schraubenmaschine und auch der Wärmetauscher aus. Deshalb wurde die Marktrecherche auch auf das Gebiet der Arbeitsfluide ausgedehnt.

Im Gespräch mit den Herstellern der Arbeitsfluide und der Schraubenmaschinen hat sich herausgestellt, dass der Schmierstoff einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Verhalten des Arbeitsfluides hat. Es ist beispielsweise darauf zu achten, dass die Viskosität des Schmierstoffes nicht unter einen unteren Grenzwert sinkt, da sonst die Schmiereigenschaften nicht mehr gewährleistet werden können. Dies kann der Fall sein bei besonders hohen Temperaturen oder aber auch durch den Einfluss des Arbeitsfluides. Um diesen Sachverhalt näher zu betrachten, soll an Versuchsanlagen die Viskositäts-Temperatur-Charakteristik sowie der Reib- und Verschleißkoeffizient verschiedener Arbeitsfluid-Schmierstoff-Paarungen studiert werden (siehe Abbildung 2).

Zusätzlich ist bei der Auswahl der Arbeitsfluide und der Schmieröle die Mischbarkeit und Brennbarkeit entscheidend, was für unterschiedliche Paarungen untersucht wurde. Diese Ergebnisse werden, neben den rechnergestützten Untersuchungen am LTT, zur Auswahl der Fluide beitragen.



Abbildung 2: Tribometer zur Bestimmung des Reib- und Verschleißkoeffizienten (links) sowie Kapillar-Viskosimeter zur Bestimmung der Viskositäts-Temperatur-Charakteristik (rechts) von Arbeitsfluid-Schmieröl-Paarungen

Das in diesem Aufgabenbereich des Teilprojekts befindliche Personal setzt sich zusammen aus dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Daniel Steger und einer studentischen Hilfskraft.

Kooperationspartner sind die im selben Teilprojekt befindlichen Lehrstühle, außerdem erfolgt ein reger Austausch mit den im Teilprojekt 1.2 beteiligten Partnern. Im Zuge der Planungen des „Speicherhauses“ kommt es zusätzlich zu einer konstruktiven Zusammenarbeit mit den EnCN Partnern des Projektes Speicher B.

Die Fördermittel wurden im vergangenen Jahr nicht komplett ausgeschöpft, dies ist vor allem auf den verzögerten Projektstart im April 2017 zurückzuführen.

Im kommenden Jahr 2018 erfolgt die endgültige Festlegung der wichtigsten Anlagenkomponenten sowie das Basic Design der Pilotanlage. Die Anlagen zur Untersuchung der Arbeitsfluide befinden sich im Auf- bzw. Umbau, erste Ergebnisse werden Anfang des Jahres 2018 erwartet.

1.3 Technische und wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für die Modellregion Wunsiedel

Sebastian Staub, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Zur Vorbereitung der technischen wie wirtschaftlichen Bewertung des Einsatzes der reversiblen ORC-Technologie am Beispielstandort Wunsiedel wurde begonnen die technische und ökonomischen Randbedingungen zu ermitteln. Dazu wurde bereits vor Ort Messtechnik bei Verbrauchern installiert um reale Lastgänge für Wärme- und Strombedarf im Versorgungsgebiet mit hoher zeitlicher Auflösung aufzuzeichnen und zu analysieren. Diese sollen zur Dimensionierung einer Demonstrationsanlage und zur wirtschaftlichen Bewertung herangezogen werden. Diese Bewertung findet mit der agentenbasierten Modellierungsumgebung AnyLogic statt, in der bereits typische Verbraucher modelliert wurden.

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

2.1 Sensibler Wärmespeicher für aufgewertete Niedertemperaturwärme

Christoph Regensburger, Eberhard Schlücker (IPAT)

Traditionell werden Wärmespeicher im Niedertemperaturbereich in Form von Warmwasserspeichern realisiert. Das Temperaturniveau dieser Speicher liegt in der Regel unter 110°C. Dadurch kann eine aufwendige Auslegung nach der EU Richtlinie 2014/68/EU vermieden werden.

Im Rahmen des Projekts liegt die Zielsetzung auf sensiblen Speichern bis 180°C. Hierbei ergeben sich mehrere Herausforderungen für das Speicherdesign. Herkömmliche Heißwasserspeicher bestehen mit einer hohen volumetrischen Wärmekapazität und niedrigen Preisen. Bei erhöhten Temperaturen sind zusätzliche Investitionen in einen zulässigen Druckbehälter notwendig. Zur Vermeidung der Druckbehäftung des Behälters kann das zur Speicherung genutzte sensible Medium gewechselt werden. Dabei ist sowohl eine Speicherung in einem Fluid wie auch in einem Feststoff denkbar. Besonderes Augenmerk muss dabei aber auf den Wärmeübergang und die volumetrische Wärmekapazität des Stoffes gelegt werden.

Die Bearbeitung des Teilprojekts hat im Juni 2017 begonnen. Dabei werden zunächst unterschiedliche Speichervarianten erarbeitet und entsprechend ihres Potentials evaluiert werden. Um bereits im Labormaßstab das Potential unterschiedlicher Ideen praktisch abschätzen zu können ist ein Versuchsstand errichtet worden. Dieser umfasst einen Speicherbehälter aus Polycarbonat, dargestellt in [Abbildung 3](#). Für die Temperaturmessung werden mehrere hochpräzise Pt-100 Elemente eingesetzt. Die Prozesssteuerung und Datenaufnahme erfolgt mittels eines Lab-View Programms.

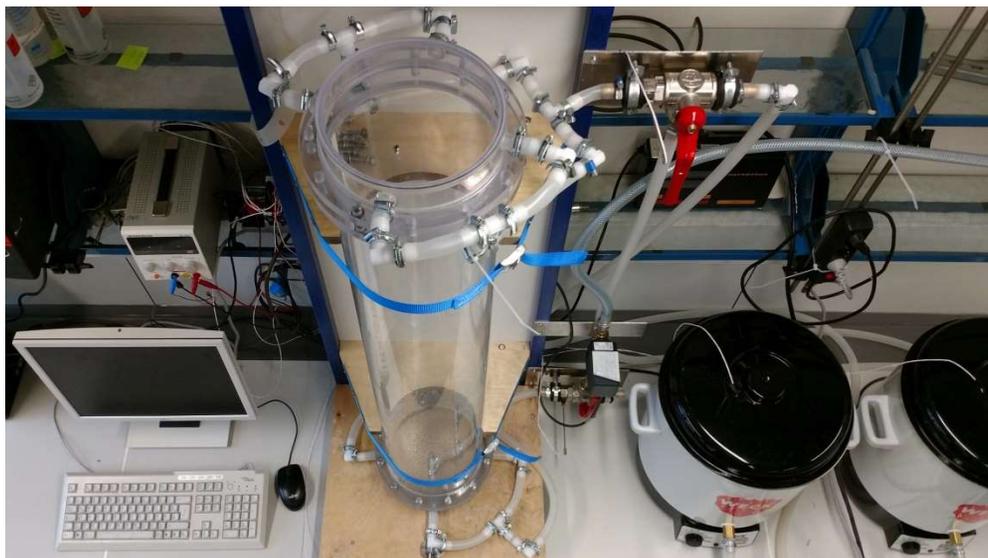


Abbildung 3: Speicherbehälter aus Polycarbonat zur Durchführung von Vorversuchen im Labormaßstab

Die aktuellen Vorversuche dienen zur Potentialabschätzung neuer Ideen und zur Effizienzsteigerung von wasserbasierten Speichern. Hier besteht bereits heute ein breites Einsatzgebiet, in dem insbesondere kostengünstige und nachrüstbare Innovationen ein großes Potential versprechen.

Der Aufgabenbereich des Teilprojekts wird aktuell von dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Christoph Regensburger bearbeitet.

Aufgrund der Planung einer Gesamtanlage in Verbindung mit dem Teilprojekt 1.1 findet hier eine intensive Zusammenarbeit mit regem Austausch statt. Hinsichtlich der Planung eines gemeinsamen „Speicherhauses“ auf dem Gelände des EnCN besteht zudem eine Kooperation mit den Kollegen aus dem Projekt Speicher B.

Die Projektmittel wurden in diesem Jahr aufgrund des verzögerten Projektstarts im Juni 2017 nicht vollständig ausgeschöpft.

Für das Jahr 2018 ist die Festlegung des zu realisierenden Speicherdesigns und der Beginn der Speicherfertigung geplant.

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

Tobias Kohler, Karsten Müller (TVT)

Im Arbeitspaket 2 sollen 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 zur Nutzung der Hydratisierungswärme desselben Stoffsystems für die drucklose Speicherung thermischer Energie bis 150°C untersucht werden. Hierbei wurden im ersten Jahr jeweils eine Laboranlage in Betrieb genommen und Machbarkeitsstudien für das jeweilige Speichersystem durchgeführt.

Thermische Energiespeicherung auf Basis der Hydratisierungswärme

Bei diesem Speicherkonzept wird die Reaktionsenthalpie der reversiblen Wasserabspaltung von Magnesiumchloridhexahydrat genutzt, um thermische Energie zu speichern. Hierbei können theoretisch bei Temperaturen bis 150°C fünf Wassermoleküle abgespalten werden. Durch die Umkehrung des Prozesses, kann anschließend thermische Energie freigesetzt werden. Da jedoch ab Temperaturen von 130°C irreversibel Salzsäure gebildet wird, können in der praktischen Anwendung nur die in Gleichung 1 und 2 angegebenen Reaktionsschritte bis hin zum Dihydrat durchgeführt werden.



Magnesiumchloridhexahydrat besitzt eine geringe Deliqueszenzfeuchte von 33% bei einer Temperatur von 30 °C. Dies bedeutet, dass sich das Material ab einer Luftfeuchtigkeit von 33 % in sich selbst aufgelöst bzw. überhydratisiert wird. Folglich muss bei der Anwendung durchgehend darauf geachtet werden, dass die Luftfeuchtigkeit unter 5 °C liegt. Um den Einfluss dieses Problems auf die Zyklusstabilität und auf die erreichbare Energiedichte des Hydratisierungsspeichers zu testen, wurde der in Abbildung 4 dargestellte Laboraufbau in Betrieb genommen.

Bei den Versuchen wird als Ausgangsmaterial $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ eingesetzt. Anschließend wird für 3 Stunden bei einer Temperatur von 110°C der Speicher durch ein hindurchströmendes Trägergas geladen, bzw. Wasser abgespalten. Im darauffolgenden Hydratisierungsschritt wird das Trägergas mit einer Luftfeuchtigkeit von 30% (unterhalb der Deliqueszenzfeuchte) in den Reaktor geleitet und somit Wärme freigesetzt. Die freigesetzte Wärme in fünf aufeinander folgenden Zyklen kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Energiedichte nach 5 Zyklen der Hydratisierung von Magnesiumchlorid-Hexahydrat nach einer Dehydratisierung bei 110 °C

Zyklus	1	2	3	4	5
Energiedichte / kJ kg^{-1}	81,6	89,0	76,6	74,3	51,0

Es zeigt sich, dass trotz Einhaltung der geringen Luftfeuchtigkeit die Energiedichte beim 5. Zyklus erheblich abfällt. Obwohl im Hydratationsschritt die Luftfeuchtigkeit eingestellt werden kann, kann eine lokale Überschreitung der Deliqueszenzfeuchte im Dehydratationsschritt nicht vermieden werden. Hierdurch kommt es zum Verkleben des Salzhydrates und zum teilweisen Verlust des Speichermaterials. Folglich kann dieses Material nicht für den Einsatz in einem derartigen Speicher empfohlen werden. Eine mögliche alternative im gewünschten Temperaturbereich wäre die adsorptive Anlagerung von Wasser an Zeolith 13X. Diese bietet höhere Speicherdichten und weist nicht die Nachteile des untersuchten Stoffsystems auf.

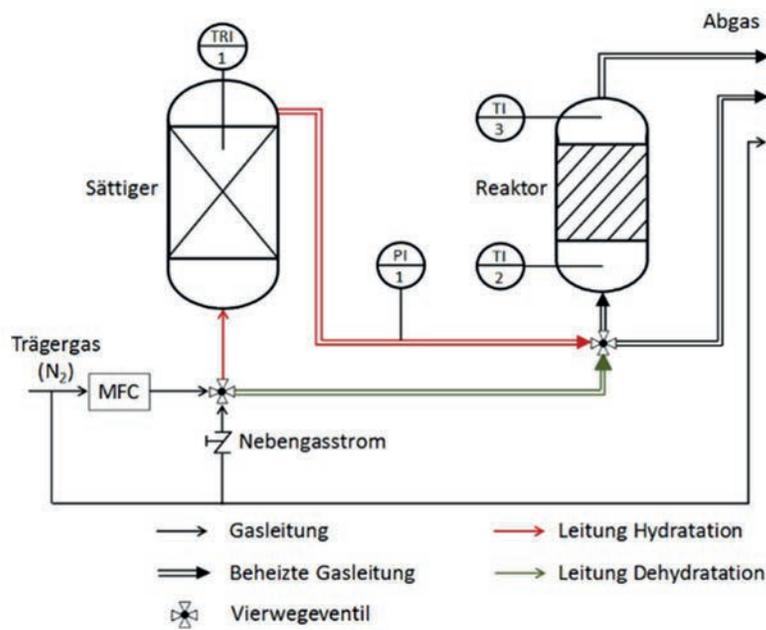


Abbildung 4: Laboraufbau zur Bestimmung der Energiedichte und Zyklenstabilität eines Wärmespeichers auf Basis der Hydratisierungswärme von $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Thermische Energiespeicherung auf Basis latenter Wärme

Das in Abschnitt 1.2 diskutierte Problem der Überhydratation spielt bei der Speicherung latenter Wärme keine Rolle, da hier ein geschlossenes Speichersystem verwendet wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei wird ein Thermo-Öl mit einer Temperatur von $136^\circ C$ in ein innenliegendes beripptes Wärmeübertragungsrohr geleitet.

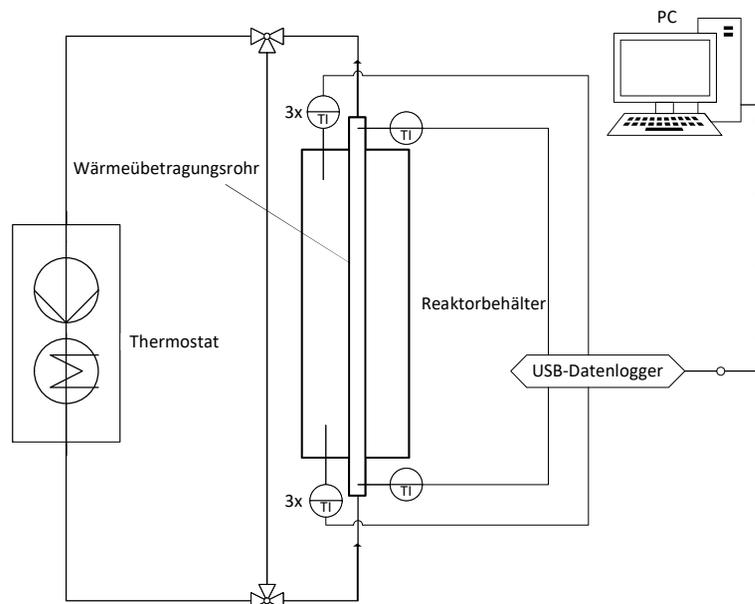


Abbildung 5: Versuchsaufbau des latenten thermischen Energiespeichers

Durch die eingetragene thermische Energie schmilzt das im Außenmantel vorgelegte Magnesiumchloridhexahydrat bei konstanter Temperatur von $116,7^\circ C$. Ist der Schmelzvorgang abgeschlossen, wird das Thermo-Öl zum Entladen des Speichers mit $96^\circ C$ in das Übertragungsrohr geleitet. Durch den Kristallisationsvorgang im Außenmantel wird das Thermo-Öl aufgeheizt. Die Temperaturdifferenz bei diesem Aufheizvorgang zwischen Ein- und Austritt des Öls ist hierbei proportional zur gespeicherten Wärme. Die erzielten Energiedichten (Tabelle 2) deuten auf eine hohe Zyklenstabilität

und ein großes Potential des Speichersystems hin. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Einsatz des Systems nur bei Temperaturen um den Schmelzpunkt von 116,7°C sinnvoll ist.

Tabelle 2: Energiedichte des latenten Wärmespeichers auf Basis von Magnesiumchloridhexahydrat in fünf Zyklen

Zyklus	1	2	3	4	5
Energiedichte kJ / kg	183	176	185	188	187

Um ein Up-scaling des Speichers zu ermöglichen, wird eine Simulation in der Software COMSOL Multiphysics aufgebaut. Die Schmelz- und Kristallisationsfronten der Simulation sollen an den Laboraufbau angepasst werden. Ist dies erfolgreich, können Designoptimierungen des Speichers zukünftig durchgeführt werden. Zur Analyse des Schmelz- und Kristallisationsfronten im System, werden die Versuche in einem Computertomographen durchgeführt, welcher es ermöglicht Querschnittsbilder an unterschiedlichen Positionen im Reaktor mit einer zeitlichen Auflösung von 7 Sekunden aufzunehmen. Ein Beispielbild einer Querschnittsposition ist in Abbildung 6 dargestellt. Die klar erkennbare Front zeigt, dass diese Messmethode sehr gut geeignet ist, um den Prozess genauer analysieren zu können.

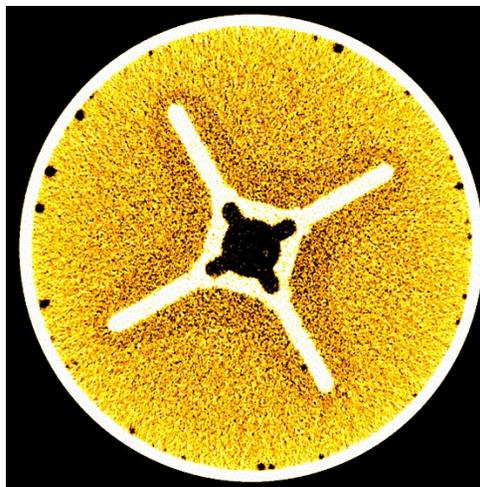


Abbildung 6: Querschnittsbild des Reaktors aufgenommen mit einem Computertomographen während des Schmelzvorgangs (dunkel: Flüssigphase; hell: Festphase; schwarz: Hohlräume; weiß: Aluminium).

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

Peter Bazan, Daniel Scharrer, Reinhard German (INF7)

Mit den Fördermitteln für Personalkosten wurde Herr Dr.-Ing. Peter Bazan zum 01.01.2017 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.

In der Phase 1 des EnCN und weiterer Projekte wurde der Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy entworfen, der die schnelle Entwicklung hybrider Simulationsmodelle vernetzter intelligenter Energiesysteme ermöglicht. Dafür stellt i7-AnyEnergy eine Bibliothek mit Komponenten für Solareinstrahlung, Wind, Photovoltaik, Windkraftanlagen, Strom-/Wärmebedarf und Batteriespeichern zur Verfügung. Die Software soll um die benötigten Komponenten für Niedertemperatur-Speicher erweitert werden und wird dann zur Untersuchung verschiedener Szenarien eingesetzt. Die benötigten Kenngrößen zur Erstellung der Komponenten des HP-ORC-Systems werden durch das TP SP1-1 bereitgestellt und die Kenngrößen für die Niedertemperatur-Speicher werden in den Arbeitspaketen 1 und 2 des TP SP1-2 ermittelt.

Wegen der Anforderung der beteiligten Projektpartner an Berechnungen zur Dimensionierung und Grundlastfähigkeit des Systems bestehend aus Niedertemperatur-Speicher und HP-ORC-System wurden die Entwicklung erster Niedertemperatur-Speicher-Modelle und die Berechnung verschiedener Szenarien vorgezogen und das Konzept im Rahmen der EnCN-Sommerkonferenz präsentiert [7]. Darauf aufbauend wurde ein parametrierbares Simulationsmodell eines 1 MWh Niedertemperatur-Speichers erstellt [8]. Die Simulation arbeitet mit Energieflüssen und Energiemengen und besteht aus der Wärmepumpe (HP), dem ORC-System (ORC), dem Niedertemperatur-Speicher (HS), dem Modell der überschüssigen elektrischen Leistung aus PV-Anlagen, dem Modell der Grundlast und dem Betriebsalgorithmus (Abbildung 7).

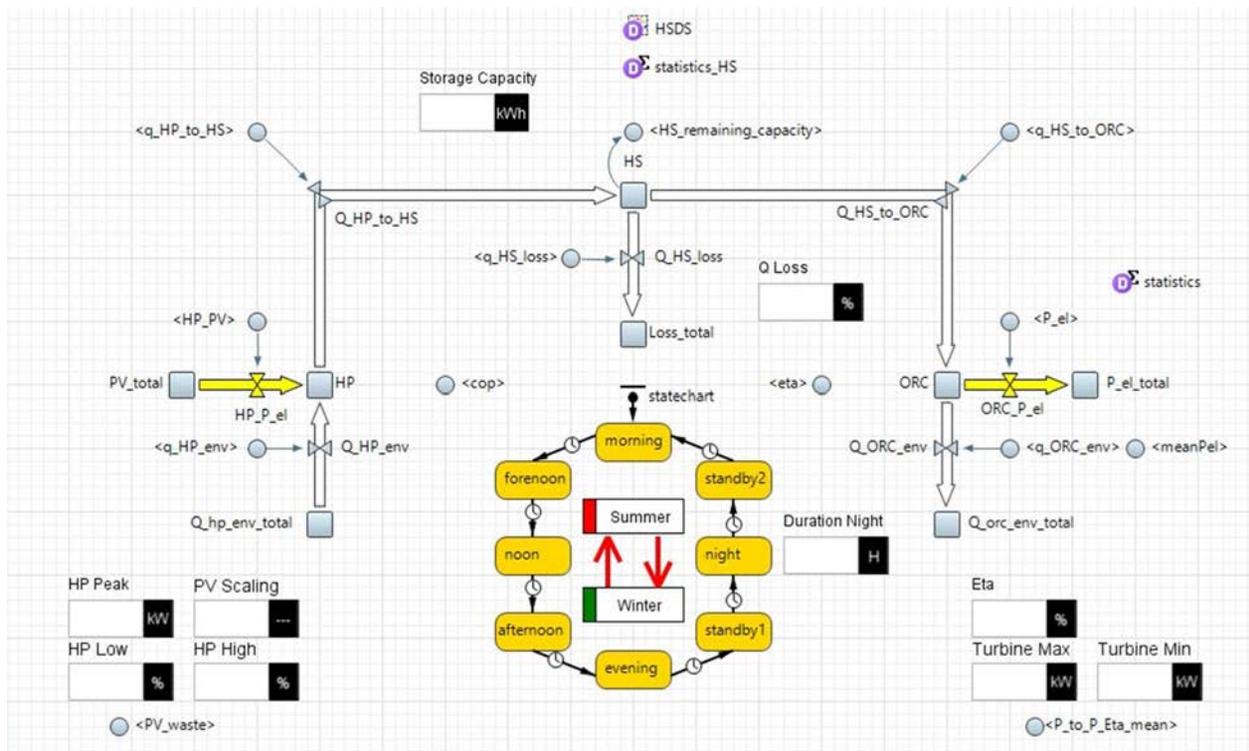


Abbildung 7: Simulationsmodell des parametrierbaren Niedertemperatur-Speicher-Systems

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden die zu untersuchenden Parameter erstellt und die sich daraus ergebenden Szenarien für jeweils ein Jahr simuliert. Der auf 1 normierte Überschussstroms aus PV-Anlagen folgt der in Deutschland erzeugten Leistung und kann in seiner Größe durch einen Skalierungsfaktor verändert werden. In Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Überschussstroms aus PV-Anlagen und aus den Parametern der Einzelkomponenten wurden dann Größen wie z.B. die Auslastung der Wärmepumpe und der Power-to-Power-Wirkungsgrad berechnet (Abbildung 8). Ein wichtiges Ergebnis ist, dass sich ab einem Skalierungsfaktor (SF) von 250 der Power-to-Power Wirkungsgrad nur minimal ändert und dafür ein Betrieb der Wärmepumpe von 90 % in Teillast bzw. 75 % in Volllast ausreichend ist.

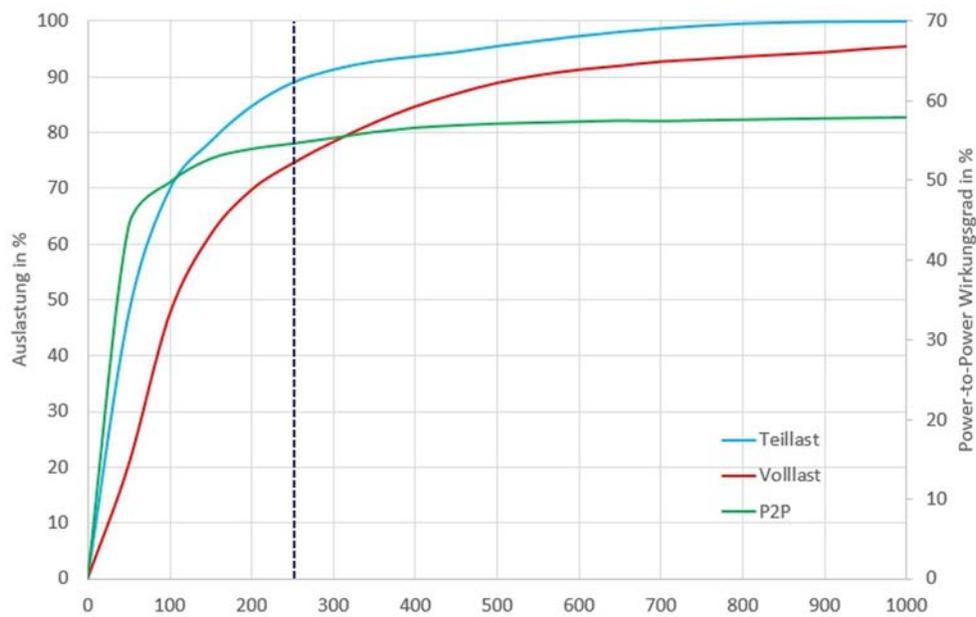


Abbildung 8: Auslastung der Wärmepumpe und Power-to-Power Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor des Überschussstroms aus PV-Anlagen

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen die erstellten Komponenten in i7-AnyEnergy integriert werden und dort für Untersuchungen bezüglich des Einsatzes in Verbindung mit Rechenzentren zur Verfügung stehen. Die Parameter der Komponenten müssen dabei dann gemäß der durch die Projektpartner realisierten Anlagen und von diesen abgeleiteten detaillierten Kennlinien ersetzt werden.

3 Spitzenlastfähige Hochtemperatur-Speicher (SP2)

3.1 Dynamische Speicherung von Überschussstrom in isothermen Heatpipe-Carbonatspeichern (EVT)

Christoph Lange, Dominik Müller, Jürgen Karl (EVT)

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik ist seit 01. Januar 2017 ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (Christoph Lange) für das Projekt tätig. Nach einer Einarbeitungs- und Recherchezeit wurden Konzepte für den isothermen Heatpipe-Carbonatspeicher diskutiert und erste Auslegungsberechnungen vorgenommen, um die Größe des Reaktoraufbaus festzulegen sowie die Standortanforderungen zu prüfen. Dabei trat der Zielkonflikt zutage, dass ein schlanker und hoher Reaktor besser für eine Fluidisierung und somit für eine gute Wärmeübertragung ist, jedoch die Höhe des geplanten Standortes in Halle 13, dem sogenannten „Speicherhaus“, limitiert ist, und somit an die Gegebenheiten angepasst werden muss. Für eine optimale Wärmeübertragung und ein gutes Wirbelschicht-Betriebsverhalten des Reaktors ist eine Fluidisierung u/u_0 zwischen 3 und 6 anzustreben. Um diese im Versuchsbetrieb mit reinem CO_2 als Fluidisierungsmedium erreichen zu können, darf der Reaktordurchmesser nicht größer als 0,55m sein bei einer angenommenen Entladeleistung von 20 kW. Die sich mit dem berechneten Durchmesser aus der Speicherkapazität des CaO/CaCO_3 ergebende Reaktorhöhe beträgt 3m. Aufgrund der limitierten Bauhöhe wurde die angestrebte Reaktorhöhe auf 2m reduziert. (Abbildung 9)

CO₂ Gehalt im
Fluidisierungsmedium

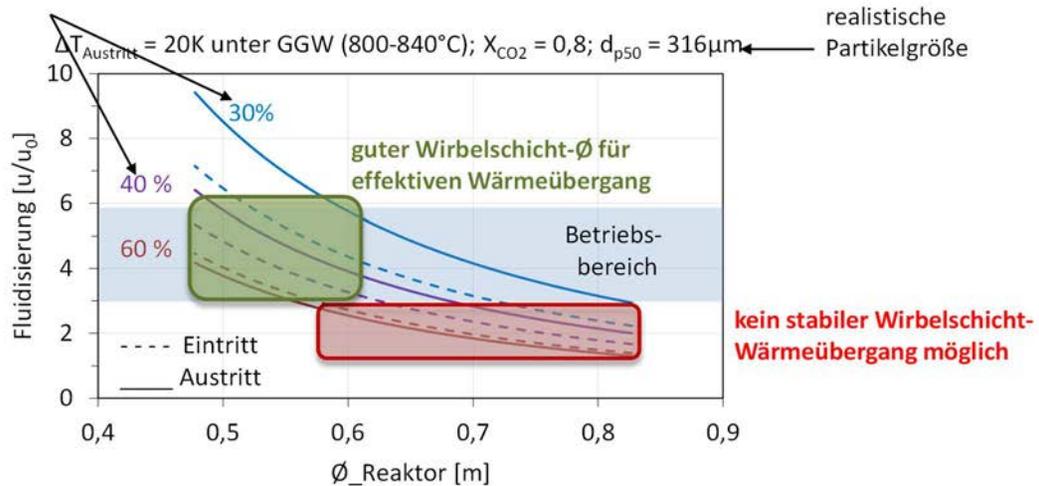


Abbildung 9: Betriebsbereich der Wirbelschicht im Carbonatspeicher bei der Karbonierung; notwendige Reaktordurchmesser für optimierte Wärmeübertragung

Um die Reaktorhöhe nicht weiter zu limitieren, wurde ein innovatives Heizkonzept für die direkte elektrische Beheizung der Heatpipes entwickelt, welches sich noch in der Testphase befindet. Laut Antrag soll Überschussstrom für den Wärmeeintrag in den Reaktor genutzt werden. Außerdem sollten die guten Wärmeübertragungseigenschaften von Heatpipes für die Beheizung der Carbonatschüttung im Reaktor genutzt werden. Nach Analyse der Machbarkeit und Eignung verschiedener Konzepte der elektrischen Beheizung, fiel die Entscheidung darauf, Hochtemperatur SiC- (Silicium-Carbid) Elemente einzusetzen, um die Heatpipes von innen zu beheizen. Bis jetzt wurden zwei Heatpipes dieser Art gebaut, um die Einsatzfähigkeit zu überprüfen, der Test mit SiC-Heizelement steht noch aus.

Im Zuge der Konzeptionierung wurde weiterhin ein innovatives Heatpipe-Dampferzeuger-Konzept (Abbildung 10) entwickelt, welches auf der regelbaren Isolierung des Dampferzeugers gegenüber der Heatpipe beruht. Dabei wird ein Regelstab in den Dampferzeuger eingeführt, um die Heatpipe im Speicherbetrieb sowie bei der Speicherbeladung gegenüber dem Dampferzeuger zu isolieren.

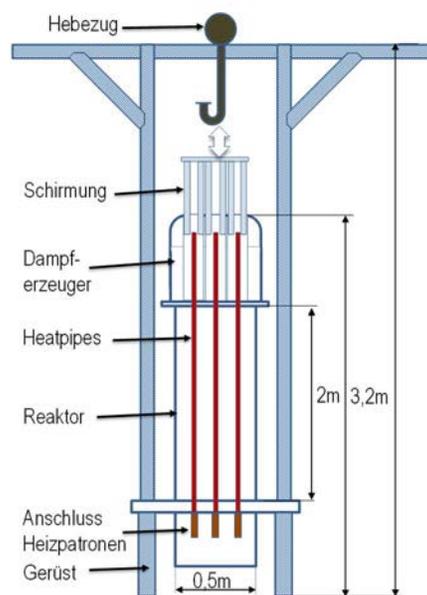


Abbildung 10: geplanter Anlagenaufbau am EnCN (Schema)

In Folge der Entwicklung der neuen Konzepte wurde am Energie Campus Nürnberg ein Teststand aufgebaut, um die Be- und Entladevorgänge wärmeübergangsseitig zu überprüfen. Dabei soll zum einen der Wärmeübergang von Heizelement auf Heatpipe untersucht werden, sowie der von Heatpipe auf Dampferzeuger unter Einfluss der Regelung. Aktuell läuft die Inbetriebnahme. (Abbildung 11)

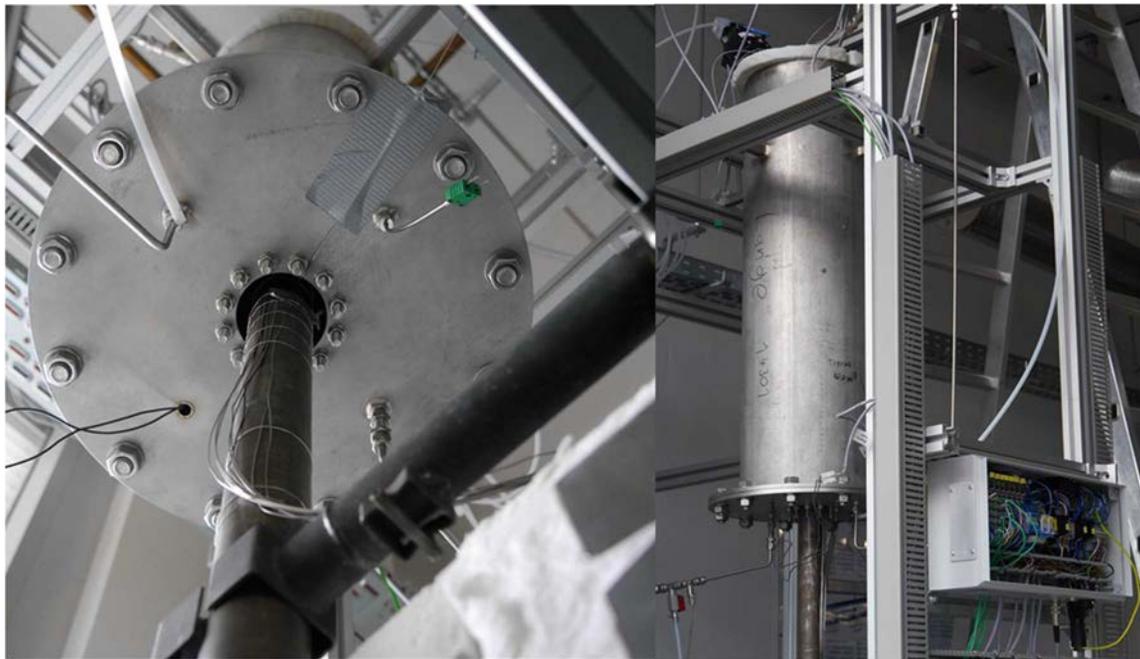


Abbildung 11: Heatpipe-Dampferzeuger-Teststand

In 2018 sollen Untersuchungen an der TGA (Thermo-gravimetrische Analyse) durchgeführt werden, um geeignete Sorbentien für den Carbonatspeicher zu charakterisieren und auszuwählen. Weiterhin wird angenommen, dass durch die isothermen Prozessbedingungen um 800-850°C eine bessere Zyklenstabilität des Carbonats erreicht werden können, als in der Literatur zum Carbonate Looping angegeben. Mildernde Bedingungen im Speicherkonzept sind u.a. die gegenüber dem CaL-Verfahren niedrigere Kalzinierungstemperatur sowie die längere Karbonierungsdauer, die eine höhere Ausnutzung der CO₂-Aufnahmefähigkeit des Materials zulässt. Die Untersuchungen sollen diese Annahmen validieren und optimale Prozessbedingungen für den Speicherbetrieb finden.

Die Konstruktion der Pilotanlage ist aktuell in der Finalisierung, sodass der Baubeginn 2018 erwartet wird. Mit dem ZAE/iMEET besteht eine enge bilaterale Kooperation bezüglich der Integration der optischen Messtechnik in die Planungen; mit regelmäßigen Projekttreffen wird auch die Verknüpfung zu den anderen Arbeitspaketen gewährleistet. Die Ausgaben am EVT im Rahmen von Teilprojekt 2 betragen für das Jahr 2017 94.261,77€ bei einer Mittelzuweisung von 141.000€ im Jahr 2017.

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

Andres Osvet, Christoph Brabec (i-MEET)

Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Strahlungseigenschaften von CaCO₃ und CaCO₃/CaO Granulat untersucht. Zudem wurden thermographische Phosphoren entwickelt, die bei Temperaturen zwischen 800 °C und 1000 °C in CaCO₃ Speicher verwendbar sind.

Thermographische Phosphoren

Vorgehend haben wir Methoden entwickelt um die Temperaturverteilung mit Hilfe von Mischungen von zwei Leuchtstoffen, oder zwei verschiedenen Aktivatoren im gleichen Kristallgitter zu messen. Dabei haben die Photolumineszenz-Intensität und Lumineszenz-Wellenlängen eine Temperaturabhängigkeit. Diese Methode ist insofern

attraktiv, da sie die Möglichkeit bietet günstige RGB-Kameras zur Gewinnung von 2D-Bilder zu verwenden, indem das Signal des Roten durch das Signal des blauen oder grünen Kanals geteilt wird, wenn der Leuchtstoff schlau gewählt ist. Für die Anwendung bei CaCO_3 Speichern ist es allerdings schwer, stark lumineszierende Leuchtstoffe zu finden, die bei 1100 K stabil sind. Dabei macht auch die starke thermische Emission bei diesen Temperaturen die Verwendung von rot-emittierenden Leuchtstoffen unpraktikabel.

Wir haben an der Entwicklung von Blau-emittierenden thermographischen Leuchtstoffen gearbeitet, die für Temperaturen bis 1200 K geeignet sind. Unter den besten Kandidaten sind anorganische Kristalle, dotiert mit Dysprosium (Dy^{3+}), bei denen das Intensitätsverhältnis der ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ und ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ Übergänge eine starke Temperaturabhängigkeit besitzt. Y_2SiO_5 ist ein high-Band Gap Oxid, welches große Mengen an Seltene Erdionen aufnehmen kann und eine hohe chemische Stabilität besitzt. Wir haben den Leuchtstoff auf zwei Arten synthetisiert: i) Feststoffreaktion der beteiligten Oxide bei 1473 K und ii) Sol-Gel Synthese aus Isopropoxiden und TEOS mit anschließendem Ausheilen bei 1473 K. Wir haben verschiedene Flussmittel und Dotierkonzentrationen untersucht und herausgefunden, dass LiF als Flussmittel zum Wachstum von gut-facettierten Kristalliten mit Größen bis zu mehreren 10 μm notwendig ist. Der Temperatur-Sensitivitätsbereich ist vergleichbar mit dem von YAG:Dy^{3+} , wobei das Intensitätsverhältnis dem Boltzmann Gesetz bis ca. 1300 K folgt. Der Lumineszenz- Abklingzeit von Dy^{3+} ist allerdings schneller in YAG. Der Zerfall ist stabil bis etwa 1200 K und kann für Thermometrie bei höheren Temperaturen verwendet werden. Durch Festkörperreaktionen wurde mikroskopisches YAlO_3 Pulver dotiert mit bis zu 5 mol% Perowskit-Struktur synthetisiert. Dabei war LiF wieder wichtig, um eine hohe Gitterqualität und die Eingliederung von Dy^{3+} in das Gitter zu gewährleisten. Zusätzlich verbessern Li^+ Ionen, eingesetzt als Co-Aktivator, die Lumineszenz-Effizienz von Dy^{3+} . Die optimale Dotierkonzentration war 2 mol% und die Lumineszenz-Intensität war mehr als doppelt so hoch, als von YAG:Dy^{3+} . Das Intensitätsverhältnis folgt dem Boltzmann Gesetz bis zu ca. 1300 K und die Sensitivität zur Temperatur ist $0,0086 \text{ K}^{-1}$ bei 1000 K (zum Vergleich: in YAG:Dy^{3+} ist die Sensitivität $0,00064 \text{ K}^{-1}$). Das dritte untersuchte Material war Kalzium-Scandium-Silikat-Granat, welches als effiziente und stabile Matrix bekannt ist. Der nutzbare Temperaturbereich der $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Dy}$ Proben war ähnlich, verglichen mit den vorhergehenden Materialien. Die Sensitivität bei 1000 K war $0,00042 \text{ K}^{-1}$ für die Proben, die durch Coprecipitation hergestellt wurden. Die, für Anwendungen sehr wichtige, Temperaturauflösung hängt offensichtlicher Weise von der Unsicherheit der Intensitätsverhältnismessung ab. Eine zurückhaltende Schätzung von 5% Ungenauigkeit bewirkt eine Temperaturungenauigkeit von etwa 20 Grad. Das gleiche Material wurde in Form von epitaktisch gewachsenen Schichten auf YAG untersucht, wobei die Sensitivität ca. 3-mal höher war. Allerdings behindert das relativ komplexe Wachstum seine Anwendung.

Für die Hochtemperaturmessungen wurde am Lehrstuhl iMeet in Erlangen ein Setup für Hochtemperatur-Lumineszenz entwickelt, wobei die Photolumineszenz in einem Ofen durch einen gepulsten Laser mit 355 nm bis zu Temperaturen um 1300 K angeregt werden kann. Die Spektren werden unter Verwendung von geeigneten Filtern mit einem Kompaktspektrometer aufgenommen (Abbildung 12). Die Abklingkurven können mit einer Si-Photodiode aufgenommen werden.

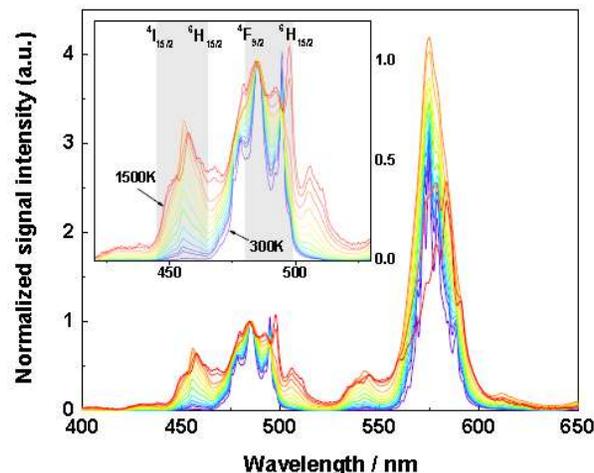


Abbildung 12: Temperaturabhängige Photolumineszenzspektren von $\text{YAlO}_3:\text{Dy}^{3+}$

Vorversuche für Zwei-Wellenlängenthermographie.

Die Zwei-Wellenlängen Thermographie erlaubt die zweidimensionale Messung der Temperatur auf der Probenoberfläche (Granulatoberfläche). Grundlage dieses radiometrischen Thermometrie-Verfahrens ist die wellenlängen- und temperaturabhängige Abstrahlung der zu untersuchenden Oberfläche. Weil die Emissivität (das Verhältnis der Abstrahlung des realen Körpers zu derjenigen eines idealen, schwarzen Körpers) des Granulates nicht bekannt ist, haben wir die Emissionspektren bei Temperaturen zwischen 600 °C und 1000 °C mit einem Spektrometer gemessen. Die vom Granulat emittierte Strahlung kann bei zwei Wellenlängen (durch Bandpassfilter) mittels einer IR-Kamera oder Si Kamera detektiert werden.

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

Wolfgang Krcmar, Jan Sebastian Hildebrand (THN)

Die Abhängigkeit von Wetter- und Umwelteinflüssen bestimmt die zeitlichen Phasen der Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik. Da das Leistungsangebot von äußeren Umständen abhängt, kann die Leistungsnachfrage zeitlich nicht optimal bedient werden. Thermische Energiespeichersysteme sind geeignet, um die Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und Leistungsnachfrage auszugleichen. Sie ermöglichen einen zeitlichen Lastenausgleich und können im Idealfall eine unterbrechungsfreie Stromversorgung unterstützen. Die Anwendung kann auch zum Speichern von Überschussstrom und ungenutzter industrieller Abwärme dienen.

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Arbeitspakets ist geplant, verschiedene Werkstoffe, insbesondere keramische Baustoffe als sensible Speichermassen für elektrisch beheizte und dynamisch ausspeichernde Dampferzeuger einzusetzen. Dafür wird einerseits eine Versuchsanlage aufgebaut und betrieben, andererseits ist die Durchführung wärmetechnischer Berechnungen mittels geeigneter Finite-Elemente-Simulationen für instationäre Aufheizprozesse mit verschiedenen Formstein-Geometrien geplant. Zunächst werden konventionell hergestellte Mauerziegel innerhalb eines Hochtemperaturofens in Abhängigkeit von der Zeit und der Ofentemperatur zyklisch mit Wasser zur Dampferzeugung beaufschlagt. Nach einer vorgegebenen Zyklenzahl werden die als Speichermassen eingesetzten Materialien auf ihre werkstofftechnischen Kenngrößen wie beispielsweise Formbeständigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, thermische Ausdehnung, Porosität, spezifische Wärmekapazität, Auslaugverhalten, etc. untersucht. Für die Versuche werden geeignete Speichermassen z.B. verschiedene Mauerziegel-Sorten mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften (z.B. Scherbenrohddichte, Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität) vorbereitet und innerhalb der Hochtemperaturzone eines Ofens bzw. Autoklaven zyklisch aufgeheizt (800 °C) und durch Wassereinspritzung wieder abgekühlt (120 °C). Dabei wird der Druck auf 2 bar begrenzt. Basierend auf den experimentell ermittelten Ergebnissen und der Zyklenstabilität der Speicherwerkstoffe soll schließlich ein Konzept für einen großtechnischen Direktdampferzeuger mit einer Speicherkapazität von 10 MWh erarbeitet werden.

Auswahl der Speichermaterialien und numerische Simulation

Das Speichermaterial muss sich thermisch stabil sowie chemisch inert gegenüber dem Wärmeübertragungsfluid und dem Containermaterial verhalten. Die Energiespeicherdichte sollte mindestens im Bereich von 10 - 50 kWh/m³ liegen. Die Formgebung zur Herstellung der keramischen Speichermassen erfolgt durch Extrusion von Ziegelton mit anschließender Trocknung und keramischem Brand. Auf diese Weise ist die Formgebung keramischer Speichermassen in der gewünschten Geometrie und mit optimalen Materialeigenschaften möglich. Für Vergleichszwecke werden auch andere Speichermassen eingebaut. Diese sollen leicht verfügbar, kostengünstig und recycelbar sein. Mittels Finiter-Elemente-Simulation (FEM/CFD) wird der Zusammenhang zwischen Speichermassen-Geometrie und entstehenden thermischen Spannungen bei instationären Aufheizprozessen untersucht.

Planung und Bau eines Reaktors

Im Rahmen der Arbeitsaufgaben ist der Bau eines elektrisch beheizten Laborreaktors geplant (Abbildung 13). Neben der erwünschten Funktion der Direktdampferzeugung, werden die im Reaktor ein- und ausgespeicherten Wärmemengen

messtechnisch erfasst bzw. berechnet, um den Einfluss des Speichermaterials und dessen Geometrie in einer realistischen Anwendung zu untersuchen. Der Reaktor soll aus einem thermisch isolierten Container bestehen, der das Speichermaterial enthält. Der Container wird mit einem regelbaren Luft-Volumenstrom durchströmt, der mittels Gebläse oder Kompressor durch das System gefördert wird. Mit Dosierpumpen wird voll entsalztes Wasser zur Dampferzeugung in den Container eingespritzt. Der Containerinhalt selbst oder ersatzweise die geförderte Luft werden durch eine elektrische Heizung erwärmt, um das Speichermaterial thermisch aufzuladen. Eine Druckdifferenzmessung am Ein- und Ausgang des Containers dient der Bestimmung des Druckverlusts, während radial und axial verteilte Thermolemente das Temperaturprofil im Container aufnehmen.

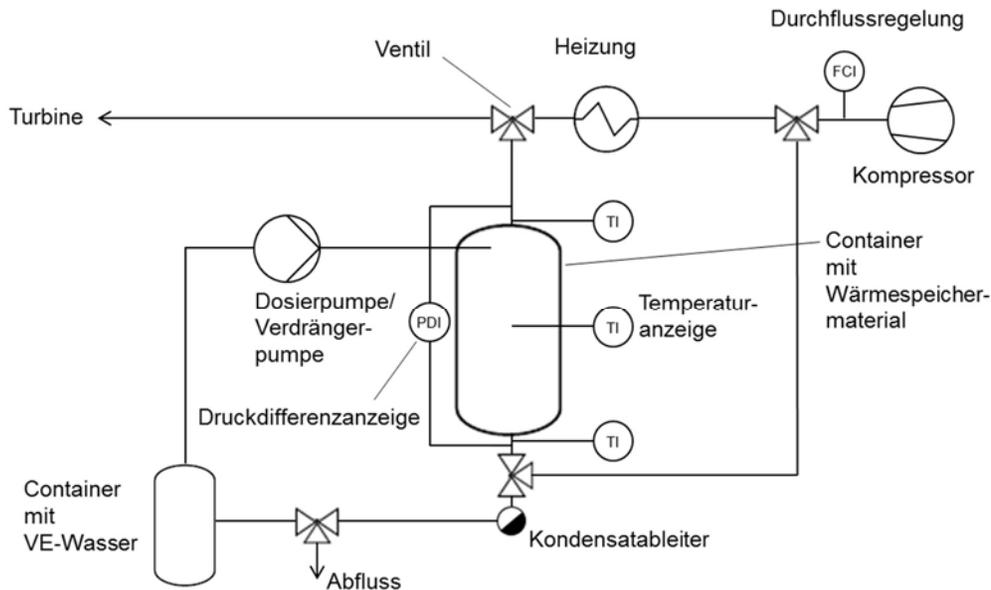


Abbildung 13: Fließschema eines Wärmespeichers zur Direktdampferzeugung.

Charakterisierung der Speichermaterialien

Die kalorischen Vorgänge während des Speicherprozesses werden mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (STA/DSC) aufgeklärt. Mögliche Zersetzungen und/oder der Übergang von Komponenten in die Gasphase, werden durch eine angeschlossene Infrarotspektroskopie (FT-IR) identifiziert und mit dem Stufenprofil der TG-Kurve abgeglichen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird mit einem Hochtemperatur-Dilatometer ermittelt. Weiterhin wird die Zyklenstabilität bei definierten Bedingungen beobachtet, um das Langzeitverhalten der Materialien als Wärmespeicher zu charakterisieren. Dazu werden die Materialproben in Abhängigkeit von der zyklischen Beanspruchung einer werkstofftechnischen Charakterisierung zugeführt. Untersucht werden beispielsweise Biegezugfestigkeit, E-Modul, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Speicherstoffe. Veränderungen der Werkstoffe z.B. durch Phasenumwandlung, Zersetzung, Auslaugung usw. sollen unter anderem durch analytische Untersuchungen geprüft werden (XRD, RFA, ICP/OES, REM). Besonders langzeitstabile Werkstoffe werden als Speichermassen im Reaktor eingesetzt und die Anforderungen an salzfreies Speisewasser nach TRD 611 durch pH- und elektrische Leitfähigkeitsmessung sichergestellt. Zur Prüfung einer möglichen Partikel- und Staubbelastung wird eine gravimetrische Staubmessung nach VDI 2066 durchgeführt.

Personelle Ausstattung

Die Arbeitsaufgaben werden von 1 Mitarbeiter mit Masterabschluss durchgeführt. Entgegen dem ursprünglich geplanten Projektstart im Januar 2017 erfolgte der tatsächliche Projektstart infolge der Verfügbarkeit des Mitarbeiters erst im November 2017. Da für das Arbeitspaket eine Laufzeit von insgesamt 4 Jahren geplant ist, verschiebt sich die ursprüngliche Zeitplanung um 10 Monate. Nach Beratung mit dem Projektleiter können alle geplanten Arbeitsaufgaben

innerhalb der Gesamtprojektlaufzeit und in Abstimmung mit einem zeitlich parallel laufenden Arbeitspaket problemlos abgearbeitet werden.

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

4.1 Reaktorkonzept für dynamische Methanisierung

Michael Neubert, Marius Dillig, Jürgen Karl (EVT)

Am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik wurde ein neues Reaktorkonzept entwickelt und anschließend im Labormaßstab gefertigt, in Betrieb genommen und damit erste experimentelle Messreihen durchgeführt. Das neue Reaktorkonzept berücksichtigt dabei in besonderer Weise die Notwendigkeiten von Power-to-Gas Prozessen:

- hohe Skalierbarkeit
- eine möglichst geringe Komplexität des Gesamtkonzeptes, die maßgeblich durch Zahl der Reaktorstufen beeinflusst ist
- aktives Temperaturmanagement durch effektive Kühlung

Die CO₂ Methanisierung in Power-to-Gas Prozessen nach Gleichung (1) ist hochgradig exotherm, wodurch eine effektive Kühlung mit hohen Wärmestromdichten notwendig wird.



Im entwickelten Reaktorkonzept erfolgt die Strukturierung eines Grundkörpers in Reaktions- und Kühlkanäle. Diese enge räumliche Strukturierung erlaubt es die Wärme direkt am Ort der Entstehung abzuführen, wodurch geringere Temperaturgradienten bei gleichbleibendem Wärmestrom auftreten. Des Weiteren erlaubt die Strukturierung eines Reaktionssystems eine sehr einfache Skalierung indem die Gesamtzahl von Einheitszellen variiert wird. Die Reaktionskanäle sind mit einem kommerziellen Nickelkatalysator auf Al₂O₃ Träger in Pelletform befüllt, d.h. marktverfügbare Katalysatoren können genutzt werden und eine besondere Nähe zur direkten industriellen Verwendung besteht. Der dargestellte Aufbruch des Reaktors in Abbildung 14 zeigt ebenfalls die Sintermetallhülsen (in orange dargestellt), welche zum einen die Katalysatorpellets fixieren und zum anderen mit ihrem relativ hohen Druckverlust zu einem gleichmäßigen Aufteilen des Gesamtvolumenstroms auf die einzelnen Reaktionskanäle führen.

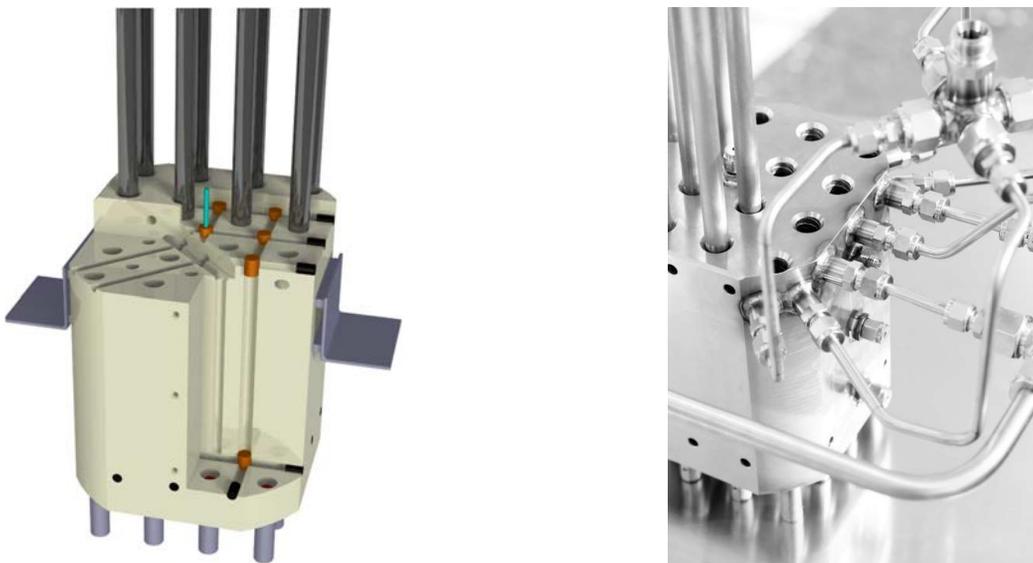


Abbildung 14: Heatpipe gekühlter Reaktor für die Methanisierung; links: Konstruktion, orange – Sintermetallhülsen, schwarz-glänzend – Heatpipes, schwarz-matt – Schweißstopfen für Verschluss einzelner Bohrungen, rechts: Prototyp

Gleichzeitig erhöht die Verwertung und/oder Speicherung der anfallenden Reaktionswärme den Gesamteffizienzgrad. Beide Randbedingungen werden durch den Einsatz von Heatpipes in den Kühlkanälen als Kühlung adressiert. Die Nutzung der latenten Verdampfungsenthalpie eines Fluids in einem geschlossenen Container erlaubt sehr hohe Wärmestromdichten bei gleichzeitig nahezu isothermem Wärmetransport. Letzterer reduziert die exergetischen Verluste deutlich und erhöht somit den Gesamteffizienzgrad des Konzeptes bei Verwendung und/oder Speicherung der anfallenden Reaktionswärme. Zusätzlich zur Wärmeabfuhr über Heatpipes tragen die ebenfalls in die Grundstruktur eingebrachten Kanäle für die Eduktvorwärmung zur Kühlung bei. Grundsätzlich könnte dies in Zukunft auch extern über einen Gas-Gas-Wärmetauscher geschehen, wobei abzuwägen bleibt ob dem apparative Zusatzaufwand ein Vorteil durch die zusätzlich abzuführende Wärme auf einem Temperaturniveau von 300°C entspricht.

Bei der Auslegung des Reaktorkonzeptes war das maßgebliche Ziel die Reaktorgeometrie so zu dimensionieren, dass der Temperaturanstieg im katalytischen Festbett durch die anfallende Reaktionswärme zu keiner Erhöhung der maximalen Synthesetemperatur über die maximal zulässige Katalysatortemperatur führt. Der am EVT verwendete Katalysator erlaubt maximale Synthesetemperaturen von 550°C. Eine Erhöhung der maximalen Synthesetemperatur über die maximal zulässige Katalysatortemperatur führt zu einer starken Katalysatordeaktivierung durch Sintern und muss vermieden werden. Eine Abschätzung der radialen Temperaturgradienten in der Hauptreaktionszone mit dem $\lambda(r)$ Modell zeigt, dass der maximale Radius 4 mm bei einer Wandtemperatur von 300°C beträgt (siehe Abbildung 15). Für die Berechnung der radialen Temperaturgradienten nach Gleichung (2) in der Hauptreaktionszone war die Ermittlung der mittleren volumetrischen Wärmequellendichte \dot{q}''' von Eintritt in die Katalysatorzone bis zum Erreichen des Temperaturmaximums notwendig.

$$T(r) = T_{Wand} + \frac{\dot{q}'''}{4 \Lambda_r(r)} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

Dafür wurden 1-D Reaktorsimulationen mit der Annahme einer idealen Propfenströmung und unter Vernachlässigung von axialem Stoff- und Wärmetransport durchgeführt. Die dafür verwendete Reaktionskinetik wurde bereits in einer früheren Veröffentlichung (Neubert et al., Energy & Fuels 31 (2), pp. 2076-2086, 2017) vorgestellt.

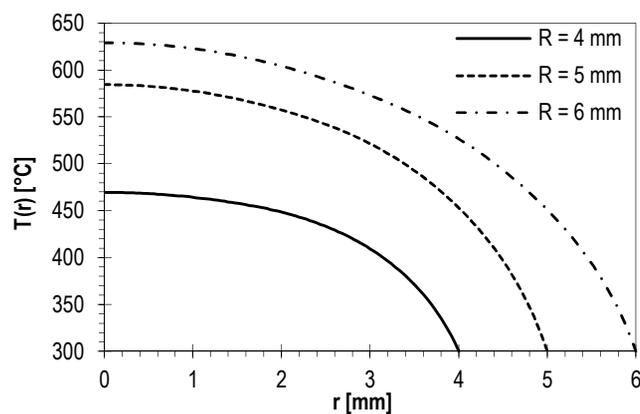


Abbildung 15: Berechnete radiale Temperaturgradienten in der Hauptreaktionszone für verschiedene Durchmesser eines einzelnen Reaktionskanals; $T_{Wand} = 300^\circ\text{C}$; Edukt – H_2 65 %, CO_2 15 %, H_2O 20%

Die ersten experimentellen Ergebnisse mit dem neuen Reaktorkonzept zeigen, dass eine effektive Reduktion der maximalen Synthesetemperatur unter die adiabate Synthesetemperatur möglich ist. In Abbildung 16 ist sowohl das axiale Temperaturprofil über die Höhenachse z im Zentrum des inneren Reaktionskanals gezeigt, als auch die Wandtemperaturen an drei verschiedenen Höhen eines einzelnen Reaktionskanals. Die Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturen im inneren eines Reaktionskanals (axiales Temperaturprofil) und den Wandtemperaturen auf gleicher Höhe entspricht dem radialen Temperaturgradienten an der jeweiligen Höhe.

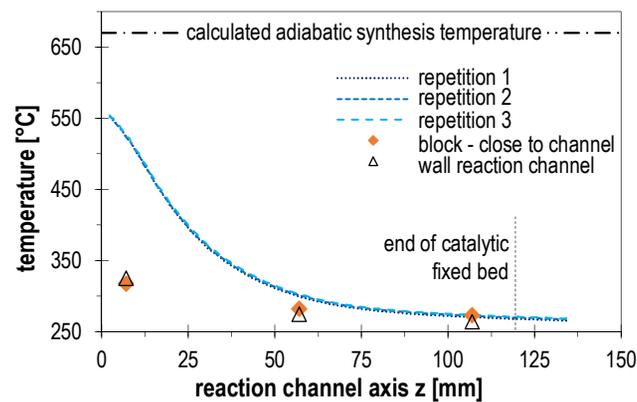


Abbildung 16: Gemessenes axiales Temperaturprofil (drei Wiederholungen) in Schutzrohr in zentralem Reaktionskanal; Wandtemperaturen an zwei äußeren Reaktionskanälen; Edukt – H₂ 80 %, CO₂ 20 %

Für eine enge Abstimmung innerhalb des Teilprojektes 3 erfolgten regelmäßige persönliche Treffen der wissenschaftlichen Mitarbeiter von EVT und CRT sowie die Teilnahme an den Jahresvollversammlungen und am Kick-Off Meeting vom Speicher A Projekt. Die Ausgaben am EVT im Rahmen von Teilprojekt 3 betrugen für das Jahr 2017 96966€ bei einer Mittelzuweisung von 101000€ im Jahr 2017.

Die weiteren Arbeiten im anstehenden Jahr 2018 umfassen die ausführliche experimentelle Charakterisierung des heatpipe-gekühlten Reaktorkonzeptes und die anschließende Hochskalierung. Die gewonnenen Ergebnisse aus der ausführlichen experimentellen Charakterisierung dienen als Grundlage für die Optimierungen, welche dann im Upscale des Reaktorkonzeptes in der zweiten Jahreshälfte 2018 implementiert werden.

4.2 Modellierung des Reaktorkonzeptes im dynamischen Betrieb

Konrad Fischer, Hannsjörg Freund (CRT)

Der Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik wurde damit betraut das am EVT erarbeitete Reaktorkonzept zu modellieren um dynamische Simulationen und modellbasierte Reaktoroptimierungen zu ermöglichen. Die Arbeit wurde planmäßig im dritten Quartal 2017 aufgenommen und schließt damit zeitlich leicht versetzt an die vorausgegangene Arbeit des EVT an. Der im Folgenden dargestellte Zwischenstand befasst sich mit den ersten Schritten der Modellierungsaufgabe.

Durch die stark ausgeprägte Symmetrie des Reaktorkonzeptes kann eine effiziente Reaktormodellierung dadurch erreicht werden, den Reaktor als Summe von Einheitszellen zu beschreiben, entsprechend dem Vorbild des Einzelrohrs im klassischen Rohrbündelreaktor. Dieses Vorgehen ermöglicht auch das einfache Upscaling des Reaktors durch „numbering up“ der Zellen. Die charakteristische Einheitszelle wurde aus dem Querschnittprofil des Reaktors ermittelt und stellt einen Kreis mit einem Radius von 17 mm dar, in dessen Zentrum sich ein einzelner, mit Katalysator befüllter, Reaktionskanal mit einem Radius von 4 mm befindet (siehe [Abbildung 17](#)). Die freigesetzte Reaktionswärme wird über das Reaktormaterial zu den benachbarten Heatpipes und Vorwärmkanälen abgeführt, wodurch sich in erster Näherung eine konstante Temperatur (T_w) am äußeren Radius der Einheitszelle einstellt. Auf Basis dieser Vorstellung soll das dynamische Reaktormodell erstellt werden.

Die Modellierung des Reaktorkonzeptes für dynamische Simulationen und Optimierung bringt Herausforderungen, die in der hier vorgestellten, frühen Projektphase analysiert wurde. Speziell der Einsatz des typischerweise in der Reaktormodellierung angewandten quasi-homogenen Modells für transiente Simulationen wird kritisch bewertet und ist voraussichtlich nicht ausreichend. Der Grund liegt in der undifferenzierten Beschreibung der Phasen, wodurch z.B. die unterschiedlichen Speicherkapazitäten der Phasen und deren Dynamik nicht berücksichtigt werden (R. Adler, Chemie Ingenieur Technik, 72 (6), pp. 555-564, 2000). Ein Lösungsansatz ist daher die Verwendung eines heterogenen Reaktormodells. Allerdings bedingt die höhere Modellkomplexität eines heterogenen Modells einen deutlich höheren numerischen Aufwand der Simulations- und Optimierungsaufgaben.

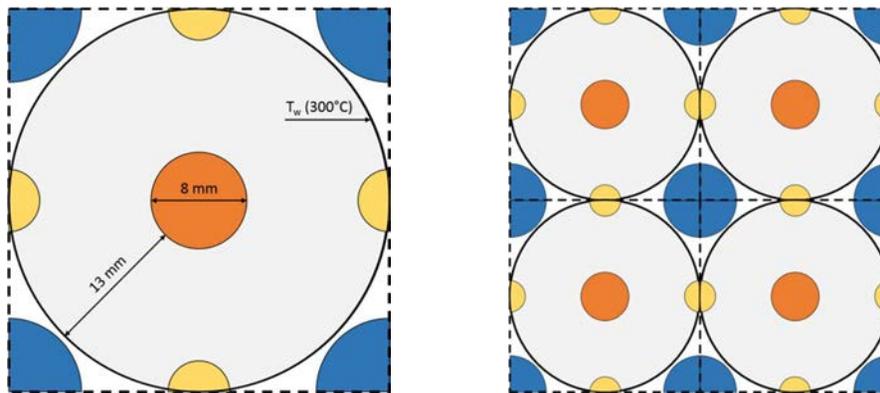


Abbildung 17: Links: Abstrahierte Einheitszelle (grau) aus Querschnitt des am EVT entwickelten Reaktorkonzepts. Die Kühlleistung der Heatpipes kann so eingestellt werden, dass sich eine näherungsweise konstante Temperatur (T_w) am äußeren Radius der Einheitszelle einstellt. Rechts: „Numbering-up“ von Einheitszellen. Orange: Reaktionskanal; Blau: Heatpipes; Gelb: Vorheizkanäle.

Eine zusätzliche Problematik ist das geringe Durchmesser Verhältnis von Reaktionskanal und Katalysatorpellet, wodurch eine genaue Beschreibung des Wärmetransports in radialer Richtung aufgrund starker lokaler Schwankungen der Porosität bzw. des Feststoffanteils erschwert wird. Diese Thematik wurde in einem Projektreffen zwischen EVT und CRT behandelt und es wurden für zukünftige Messungen zwei konkrete Maßnahmen beschlossen. Zum einen soll der bislang eingesetzte Katalysator in zerkleinerter Form eingesetzt werden, um die o.g. Problematik abzumindern. Zudem soll zukünftig ein alternativer, kommerziell erprobter Katalysator eingesetzt werden, der gründlich untersucht wurde und für den ein hochaktuelles reaktionskinetisches Modell vorliegt. Dieses ist entscheidend für die Zuverlässigkeit der Reaktormodellierung und für die Belastbarkeit der Ergebnisse. Während die erste orientierende Reaktorauslegung beruhend auf einer Kinetik nach Rönsch et al. (Chemical Engineering & Technology, 39 (2), pp. 208.-218, 2016) durchgeführt wurde, ist zu berücksichtigen, dass diese Kinetik nicht speziell für den eingesetzten kommerziellen Katalysator erstellt wurde. Daher ist mit Abweichungen zwischen Modell und Messungen zu rechnen. CRT und EVT sind daher bestrebt, zukünftig einen neuen Katalysator einzusetzen der von Koschany et al. (Applied Catalysis B: Environmental, 181, pp. 504-516, 2016) reaktionskinetisch modelliert wurde.

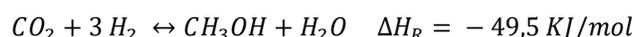
Basierend auf der Abstraktion des Reaktorkonzepts durch eine Einheitszelle sowie den angesprochenen Problemstellungen ist es das Ziel der nächsten Arbeitsschritte, die bereits ermittelten sowie noch ausstehenden Messdaten vom EVT durch ein geeignetes Modell abzubilden. In einem iterativen Prozess soll dabei die Komplexität des Modells schrittweise erhöht werden, bis eine hinreichende Modellgenauigkeit erreicht wird. Mit dem auf diese Weise validierten Modell soll dann an Hand von Simulations- und Optimierungsstudien in einem späteren Schritt die Entwicklung eines großskaligen Reaktors unterstützt werden.

Die Ausgaben am CRT im Rahmen von Teilprojekt 3 AP3 (AK Prof. Freund) betragen für das Jahr 2017 39.010€ bei einer Mittelzuweisung von 37.701€ im Jahr 2017.

4.3 Katalysatorentwicklung für die instationäre Methanolsynthese

Patrick Schüle, Jakob Albert, Peter Wasserscheid (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.



Um in einem ersten Schritt die zu Grunde liegenden Degradationsmechanismen des kommerziellen Katalysators zu verstehen und basierend darauf in einem zweiten Schritt veränderte Katalysatorsysteme zu entwickeln, wurde am

Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik eine Laboranlage umgebaut und in Betrieb genommen. Zur Durchführung eines ersten Katalysatorscreenings wurde dazu ein 600 ml Rührkesselreaktor (Behälter B-2) installiert, welcher Gasanschlüsse für die Reaktionsgase Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff, sowie für das Inertgas Helium besitzt (siehe Abbildung 18). In der Anlage können Betriebsdrücke bis 200 bar und Temperaturen bis 350°C für die Methanolsynthese eingestellt werden. Durch den Aufbau eines Gas-Vormischtanks (Behälter B-1) ist es möglich, Prozesse nicht nur im Batch-, sondern auch im Semi-Batch-Betrieb durchzuführen. Außerdem wurde ein Flüssigkeitsvorlagebehälter (Behälter B-3) installiert, welcher die Zugabe von definierten Wassermengen ins Synthesegas zu Beginn der Experimente ermöglicht. Auf diese Weise soll der Einfluss von Wasser auf unterschiedliche Katalysatoren direkt untersucht und diese Bezüglich der Abnahme Ihrer Produktivität miteinander verglichen werden.

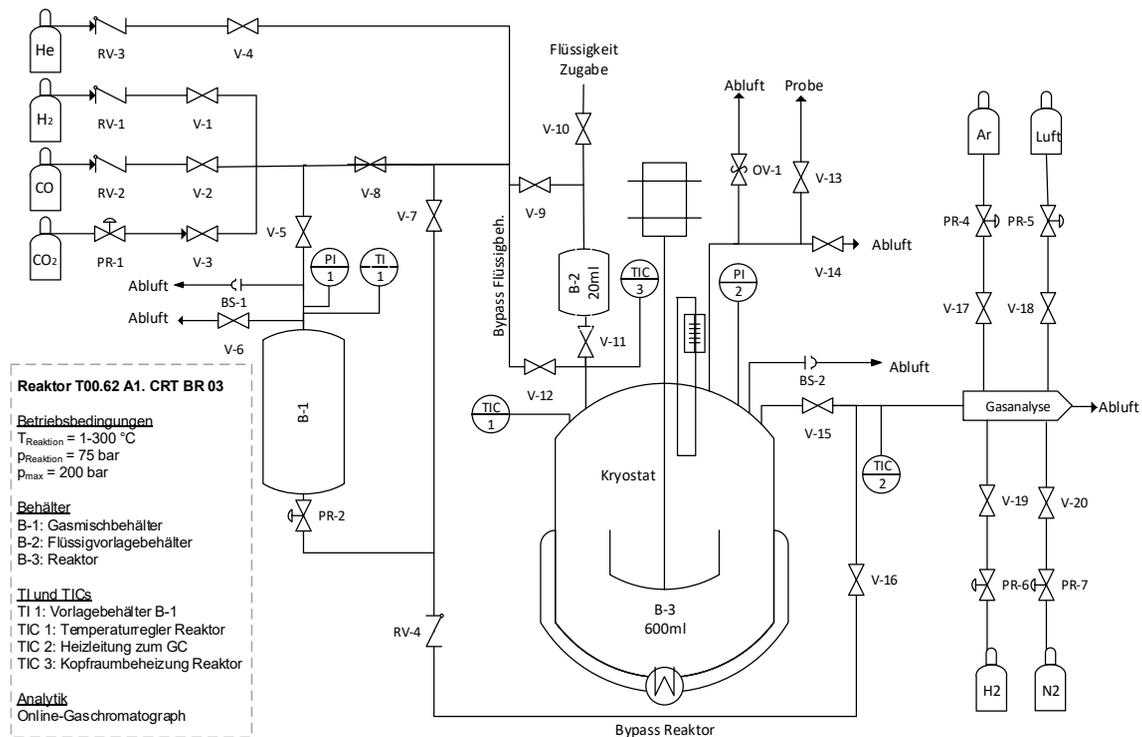


Abbildung 18: Fließbild der Laboranlage zur Untersuchung von heterogenen Katalysatoren für die instationäre Methanolsynthese

Im Gegensatz zu den gasförmigen Edukten der Reaktion sind die Produkte durch Ihre niedrigere kritische Temperatur in Kaltzonen der Anlage kondensierbar. Um dies zu vermeiden werden der Reaktorkopfraum und die Rohrleitung zwischen Reaktor und Online-Analytik (hierfür steht ein Gaschromatograph zur Verfügung) mit einem externen Regler beheizt. Die durchgeführte Kalibrierung des Gaschromatographen ermöglicht die quantitative Untersuchung der Produkt- und Nebenproduktbildung. Damit kann im Besonderen die Bildung der hauptsächlich zu erwartenden Nebenprodukte Kohlenstoffmonoxid, Methan und Dimethylether überwacht werden.

Zu Beginn des Projektes wurde ein Anforderungsprofil für die zu testenden Katalysatoren erstellt. Als Grundvoraussetzungen wurden unter anderem die thermische und mechanische Stabilität, sowie die Beibehaltung der Aktivität unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen (250°C, 75 bar) definiert. Außerdem sollen die Katalysatoren kommerziell verfügbar oder durch simple Imprägnierverfahren selbst herzustellen sein. Auf dieser Basis fand eine Auswahl von Katalysatoren für die erste Versuchsreihe statt. Dabei wurden verschiedene aktive Metallkomponenten (u.A. Platin, Palladium, Silber, Gold, Indium) mit diversen pelletierten Trägermaterialien (u.A. Aluminiumoxid, Siliziumdioxid, Zinkoxid, Zirkoniumoxid) kombiniert und in der beschriebenen Versuchsanlage zur Methanolsynthese eingesetzt. Besonders die Indium-, Gold- und Silberbasierten Katalysatoren haben sich bei diesen ersten Tests durch eine hohe Methanolproduktivität und eine geringe Nebenproduktbildung ausgezeichnet. Effekte des Trägermaterials konnten beispielsweise beim Einsatz des Silberkatalysators beobachtet werden, welcher bei Verwendung von Zirkoniumoxid eine weitaus höhere Aktivität als mit Aluminiumoxid aufwies.

Die Ausgaben am CRT im Rahmen vom Teilprojekt 3 betragen für das Jahr 2017 59.340 € bei einer Mittelzuweisung von 156.000 €. Eine Übertragung der nichtabgerufenen Mittel in 2018 wurde formlos beantragt.

In weiteren Untersuchungen im anstehenden Jahr 2018 sollen die als aktiv identifizierten Materialien unter Zugabe unterschiedlicher Wasserkonzentrationen miteinander verglichen werden. Außerdem wird die Untersuchung der Katalysatoren durch analytische Methoden (TPR, BET-Sorption, CO-Sorption) fortgesetzt, um das Verständnis der Beeinflussung der katalytischen Aktivität durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Pellets zu erweitern. In einem darauf folgenden Schritt werden die neuartigen Katalysatoren für den Einsatz in Slurry-Prozessen und in Form von strukturierten Katalysatoren (Imprägnierte SEBM-Strukturen) erprobt.

5 Schlussworte

Die in den Teilprojekten durchgeführten Forschungsarbeiten wurden in konsequenter Vernetzung der beteiligten Institute durchgeführt um die Interdisziplinarität am EnCN weiter zu stärken. Dies führte zu einem starken Austausch der Forschergruppen über die EnCN-Projekte hinaus, so dass neue gemeinsame Projekte und Drittmittelwerbungen angestoßen werden konnten. Beispielhaft stehen hier die neu eingeworbenen Drittmittel der BMWi-Projekte ORBIT und BioWasteStirling sowie die erfolgreiche Antragstellung des voraussichtlich ebenfalls 2018 beginnenden EU-Projekts (i3Upgrade), in dem Nutzung von Stahlgasen als Kohlenstoffquelle für die dynamische Methan- und Methanolsynthese untersucht werden soll. Die Realisierung der Prototypenanlagen am EnCN in den kommenden Jahren wird ein zusätzlicher Anstoß für Ausweitung der Forschungsaktivitäten im Bereich der Entwicklung neuer Speichertechnologien sein.

6 Vorträge & Poster 2017

- [1] M. Neubert; M. Dillig; J. Karl. Erdgas aus Holz. Tag der technischen Fakultät, Erlangen, 2017
- [2] M. Neubert; K. Fischer; P. Schühle; M. Dillig; J. Albert; P. Wasserscheid; H. Freund; J. Karl. Entwicklung eines heatpipe-gekühlten Reaktorkonzepts. EnCN Jahresvollversammlung, Nürnberg, 2017
- [3] C. Lange; D. Müller; J. Karl. Verfahrenstechnisches Konzept und Auslegung eines isothermen Heatpipe-Carbonatspeichers. EnCN Jahresvollversammlung, Nürnberg, 2017
- [4] D. Steger, B. Schmitt, S. Will, E. Schlücker. Speicherung von Überschussstrom mit einem regenerativen Wärmepumpen-ORC-System. CBI Symposium, 2017.
- [5] B. Schmitt, D. Steger, C. Regensburger, P. Bauer, L. Zigan, J. Karl, E. Schlücker, S. Will. Aufwertung von Niedertemperaturwärme mit reversiblen HP-ORC-Systemen. EnCN Sommerkonferenz, 2017.
- [6] T. Kohler; K. Müller. Analyse des Schmelz- und Kristallisationsverhaltens von $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ in Latentwärmespeichern mittels Computertomographie. Thermodynamik Kolloquium, 2017
- [7] R. German, P. Bazan. Dynamische Simulation der Integration großer Niedertemperatur-Speicher. EnCN-Sommerkonferenz 2017, Nürnberg, July 2017
- [8] D. Scharrer, P. Bazan, J. Karl, R. German. Simulation of a heat storage system with a heat pump and ORC process to cover the base load demand at night. 12th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2018), Düsseldorf, March 2018 [accepted 2017]

7 Veröffentlichungen 2017

- [9] I. Levchuk; F. Schröppel; L. Römling; L. Chepyga; A. Osvet; N. Khaidukov, et al., Highly luminescent $Ca_3Sc_2Si_3O_{12}:Ce^{3+}$ silicate garnet nano- and microparticles with 50-70% photoluminescence quantum yields as efficient phosphor converters for white LEDs, in: TechConnect, 4, 194, 2017
- [10] L.M. Chepyga; A. Osvet; C.J. Brabec; M. Batentschuk, High-temperature thermographic phosphor mixture YAP/YAG:Dy³⁺ and its photoluminescence properties, Journal of Luminescence, 188, 582, 2017

- [11] M. Neubert; J. Widzgowski; S. Rönsch; P. Treiber; M. Dillig and J.Karl. Simulation-Based Evaluation of a Two-Stage Small-Scale Methanation Unit for Decentralized Applications. *Energy & Fuels* 31 (2), 2076-2086, 2017
- [12] M. Neubert; P. Treiber; C. Krier; M. Hackel; T. Hellriegel; M. Dillig; J. Karl. Influence of hydrocarbons and thiophene on catalytic fixed bed methanation, *Fuel*, Volume 207, 2017
- [13] K. Großmann; T. Dellermann, M. Dillig, J. Karl. Coking behavior of nickel and a rhodium based catalyst used in steam reforming for power-to-gas applications, *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (16), 11150-11158, 2017
- [14] M. Dillig, T. Plankenbühler, J. Karl; Thermal effects of planar high temperature heat pipes in solid oxide cell stacks operated with internal methane reforming, *Journal of Power Sources* 373, 139-149, 2018
- [15] JM Leimert, M Dillig, J Karl; Hydrogen production from solid feedstock by using a nickel membrane reformer; *Journal of Membrane Science* 548, 11-21; 2018

Speicher B – Speicher mit Marktreife bis 2022

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
FAU – Lehrstuhl für technische Thermodynamik FAU – Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik FAU – Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Apparatechnik FAU – Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik FAU – Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbes. Wirtschaftstheorie FAU – Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, Industrieökonomik und Energiemärkte	TPJ1: Effiziente Wasserstoffspeicherung (Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arlt, Prof. Dr. Martin Hartmann) TPJ2: Effiziente Wasserstofflogistik (Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will, Prof. Dr. Gregor Zöttl) TPJ3: Effiziente Wasserstoffnutzung: (Prof. Dr. Peter Wasserscheid, Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing)

Projektbericht 2017

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 in dieser Hinsicht hervorragend geeignet, da sowohl das Department CBI der FAU mit den Lehrstühlen für Chemische Reaktionstechnik, Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Thermische Verfahrenstechnik und Technische Thermodynamik nahezu alle Aspekte der Technologie abdecken können. Zudem besteht ein enges Netzwerk mit 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
<http://tinyurl.com/hxxmrpq>

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. In der Dehydrierung sind beide Ansätze sinnvoll. Eine Erhöhung der Reaktionstemperatur ermöglicht kleinere Apparate. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass hohe Dehydriertemperaturen möglicherweise eine Degradation des LOHC-Materials begünstigen könnten. Eine Erniedrigung der Dehydriertemperatur dagegen erschließt möglicherweise andere Quellen für die zuzuführende Dehydrierwärme. Es konnte ein Katalysator entwickelt werden, der die Hydrierung bei Temperaturen oberhalb von 200 C ermöglicht ohne eine nennenswerte Degradation des LOHC-Materials. Durch eine spezielle Modifikation der Katalysatoroberfläche kann dieser Katalysator sowohl hydrieren als auch dehydrieren.

Diese Katalysatorneuentwicklung ist die Basis für die Erweiterung des, zuvor ebenfalls am EnCN entwickelten, oneReactor-Konzeptes. Durch die Erhöhung der Temperatur in der Hydrierung kann die Reaktionswärme auf einem Temperaturniveau oberhalb der Dehydriertemperatur genutzt werden. Zur Untersuchung dieses oneReactor – oneTemperature Konzeptes wurde ein Reaktorsystem konzipiert und ausgelegt. Die gesamte Anlage wurde in enger Zusammenarbeit mit Hydrogenious Technologies geplant und von Hydrogenious Technologies gebaut. Die Anlage basiert in weiten Teilen auf Arbeiten, die zuvor am EnCN im Rahmen des LZE-Pilotprojektes P1 durchgeführt wurden.

Der oneReactor 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.

Da die für das Speicherhaus vorgesehene Halle 13 während der ersten Förderphase nicht als chemisches Labor genutzt wurde, musste in 2017 zunächst der Umbau der Halle geplant werden. Dabei waren intensive Abstimmungen zwischen allen beteiligten Arbeitsgruppen nötig um ein Konzept für den Umbau zu entwickeln, mit dem der Betrieb sämtlicher neuen Anlagen möglich ist und das auch mit dem knappen Budget durchführbar ist. Das Speicherhaus wird umgerüstet mit:

- Absaugungsanlage mit 4000 m³/h in Ex-geschützter Ausführung
- Gasversorgung mit Inertgasen und Eduktgasen (Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid)
- Erweiterung der Druckluftversorgung

Da die Planung übermäßig viel Zeit in Anspruch genommen hat, konnten die Investitionsmittel in 2017 nicht verausgabt werden und müssen daher nach 2018 übertragen werden. Auch hat ein krankheitsbedingter Ausfall eines Mitarbeiters dafür gesorgt, dass die Personalmittel ebenfalls nicht vollständig verausgabt werden konnten.

Neben den Arbeiten am oneReactor-System wurde am EnCN eine Anlage für kinetische Untersuchungen aufgebaut und in Betrieb genommen. Der kontinuierlich betriebene Mehrphasen-Berty-Reaktor soll Erkenntnisse über die Reaktionskinetik der Hydrierung und der Dehydrierung von LOHCs liefern. Dieses neue Reaktorkonzept soll dabei Beeinflussungen des Wärme- und Stofftransports auf die Reaktionsgeschwindigkeit durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten unterbinden. Nach erfolgreicher Installation der Anlage wurde zuerst die Hydrodynamik in einem transparenten Coldflow-Reaktor untersucht. Durch eine Optimierung der Turbine bzgl. Schaufelwinkel, Schaufelanzahl und Höhe konnte die Strömungsgeschwindigkeit um 80 % auf 32 cm/s gesteigert werden. Weiterhin wurde ein Aufsatz entwickelt, der direkt über der Turbine als Strömungsbrecher fungiert, um die Trombenbildung bei hohen Drehzahlen zu unterbinden. In der nächsten Projektphase wurde die Peripherie an die Hausleitungen angeschlossen, in Betrieb genommen und kalibriert. Bereits nach dem ersten Hydrierungs-Experiment mit LOHC wurde deutlich, dass starke Pulsationen im

Rektorausgang auftreten. Ursache dafür ist, dass sowohl LOHC als auch Wasserstoff durch den gleichen Ausgang strömen und im Druckhalteventil periodisch einen unterschiedlichen Druckverlust verursachen. Durch den unsteadyen Wasserstoffstrom war eine Analytik der Hydrierungsgeschwindigkeit nicht möglich. Deshalb wurde ein Pulsationsdämpfer entwickelt, der den Pulsationsvolumenstrom von 800% des eigentlichen Volumenstroms auf maximal 130% dämpft und somit auswertbar macht. Nun sollen die Kinetiken für die Hydrierung bei 0 – 30 bar und 180 – 250°C und für die Dehydrierung bei 0 – 5 bar und 275 – 300°C untersucht werden.

1.2 Systemanalytische Untersuchung der LOHC-Technologie

Das Unterprojekt wurde in der Arbeitsgruppe von Prof. Wolfgang Arlt durchgeführt. Im Rahmen des Unterprojekts wurden drei grundsätzliche Fragestellungen behandelt: Die Integration von Wärmespeichern in LOHC-Systemen, die Dynamik von LOHC-Systemen und ihre Zuverlässigkeit.

Die Evaluierung von Konzepten zur Speicherung der Hydrierwärme zur späteren Dehydrierung zeigte, dass das Volumen der Wärmespeicher so groß wäre, dass es den Speicherdichtenvorteil der Wasserstoffspeicherung auf LOHCs konterkarieren würde. Das kombinierte Volumen von LOHC, Wärmespeicher und Freisetzungseinheit ist größer als das eines Druckwasserstofftanks mit gleichem Energieinhalt. Dementsprechend muss konstatiert werden, dass Zwischenspeicherung der Hydrierwärme für die anschließende Dehydrierung nicht zielführend ist. Der Fokus der weiteren Arbeiten wurde daher auf die weiteren Fragestellungen gelegt.

Die Anpassungsgeschwindigkeit von LOHC-Systemen auf Lastwechsel (und damit die darstellbare Dynamik der Energiebereitstellung) wird einerseits durch die Trägheit der chemischen Freisetzungseinheit bestimmt. Auf der anderen Seite kann durch die Änderung des Druckniveaus des freien Wasserstoffs zwischen Freisetzung und Brennstoffzelle ein Puffer erzeugt werden, der eine erhöhte Dynamik erlaubt.

Bei Lastprofilen von Haushalten treten häufig Sprünge im Strombedarf auf. Soll der Strombedarf eines Haushalts mit einer PV-Anlage und einem LOHC-System gedeckt werden, so müssen diese Sprünge kompensiert werden. Dies ist mit Hilfe des freien Wasserstoffvolumens zwischen Dehydrierer und der Brennstoffzelle möglich. Zu klären ist die Frage, wie groß dieses Volumen sein muss, damit die Nachfrage an Strom nicht nur integral gedeckt werden kann, sondern auch zum konkreten Zeitpunkt. Um dieses Volumen bestimmen zu können, wurde eine Simulation mittels MATLAB Simulink durchgeführt. Zur Parametrisierung des dynamischen LOHC-Modells wurden Messdaten aus einem vorangegangenen Projekt verwendet.¹

Es wurde ein 2-Personen Haushalt mit durchschnittlich 6,7 kWh d⁻¹ in zwei Szenarien betrachtet. Die PV-Anlage liefert in den beiden Szenarien durchschnittlich 14,4 bzw. 19,2 kWh d⁻¹. Integral sollte die Energie der PV also zur Deckung des Eigenbedarfs bei Vorhandensein eines Energiespeichers in beiden Szenarien ausreichen.

Ohne das LOHC-System wird in den untersuchten Szenarien ein Autarkiegrad von 51,8 % (PPV, mittel=0,6 kW) bzw. 55,9% (PPV, mittel=0,8 kW) erreicht. Bei Verwendung des LOHC-Systems kann der Autarkiegrad auf 75 bis 80 % erhöht werden. Die fehlenden 20 bis 25% sind auf die unzureichende Anpassungsgeschwindigkeit der chemischen Freisetzungseinheit an das Lastprofil zurückzuführen. Wird das Volumen zwischen Reaktor und Brennstoffzelle erhöht (was aufgrund der Reinigungseinheiten ohnehin nötig ist) verbessert sich die Dynamik und damit auch der Autarkiegrad.

Bei Vergrößerung des H₂-Volumens steigt der Autarkiegrad anfangs sehr stark an, bevor er ab einem gewissen Punkt abflacht (im betrachteten Fall ist dies dann ein linearer Verlauf) und bei 100% in eine Sättigung übergeht. Im betrachteten Szenario wird mit einem freien Wasserstoffvolumen von 0,1 m³ bereits ein Autarkiegrad von über 90% erreicht. Soll das System komplett unabhängig vom Netzstrom sein, müsste das Volumen an durchschnittlichen Tagen 1,0 m³ und an Tagen mit geringer Einstrahlung 1,4 m³ betragen (Abbildung 1).

¹ André Fikrt, Richard Brehmer, Vito-Oronzo Milella, Karsten Müller, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Nicolas Alt, Eberhard Schlücker, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, „Dynamic Power Supply by Hydrogen Bound to a Liquid Organic Hydrogen Carrier“, *Applied Energy*, **2017**, 194, 1-8

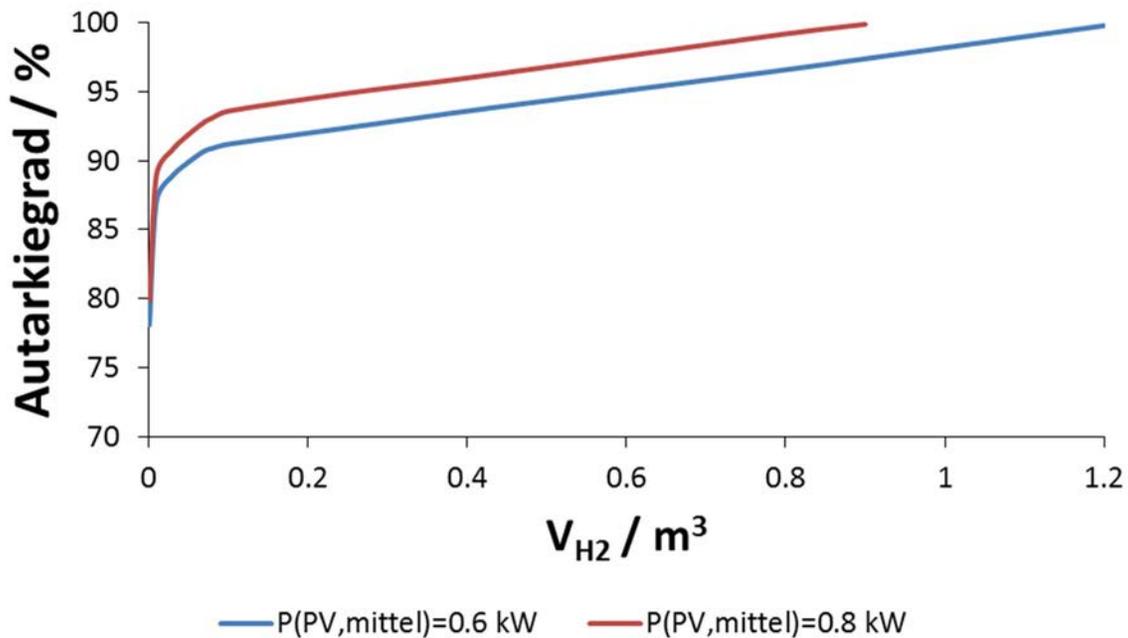


Abbildung 1: Erreichbarer Autarkiegrad des Wohnhauses unter Berücksichtigung der Dynamik der Energiebereitstellung als Funktion des freien Wasserstoffvolumens

In einem dritten Projekt wurde die Zuverlässigkeit von LOHC-basierter Energiespeicherung untersucht (Abbildung 2). Fragestellung war dabei nicht allein die Ausfallwahrscheinlichkeit, sondern auch die Wiederherstellung der Funktionalität nach einer Störung (Resilienz). Es konnte gezeigt werden, dass die Verfügbarkeit (also der Anteil der Zeit über einen längeren Zeitraum zu dem das System statistisch einsatzfähig ist) bei ausreichender Wartung über 97% liegt. Die Verfügbarkeit der Teilfunktionalitäten (Ein- bzw. Ausspeicherung) liegt sogar über 98%. Voraussetzung hierfür ist allerdings neben der Einhaltung eines Wartungsplans die schnelle Reaktionsfähigkeit von Reparaturteams. Für Anwendungsszenarien, bei denen das System in Europa beispielsweise zur Energiespeicherung außerhalb von Privathaushalten eingesetzt wird, scheint diese Annahme gerechtfertigt zu sein. In geeigneten Anwendungsszenarien kann die LOHC-Technologie damit eine hohe Zuverlässigkeit bieten. Im Gegensatz zu Batterien führt ein Ausfall in der Regel nur zum einem Teilverlust der Funktionalität. Allerdings ist die Reduktion von Risiken durch die Schaffung von Redundanz schwieriger mit LOHC-Systemen zu realisieren als mit Batterien.

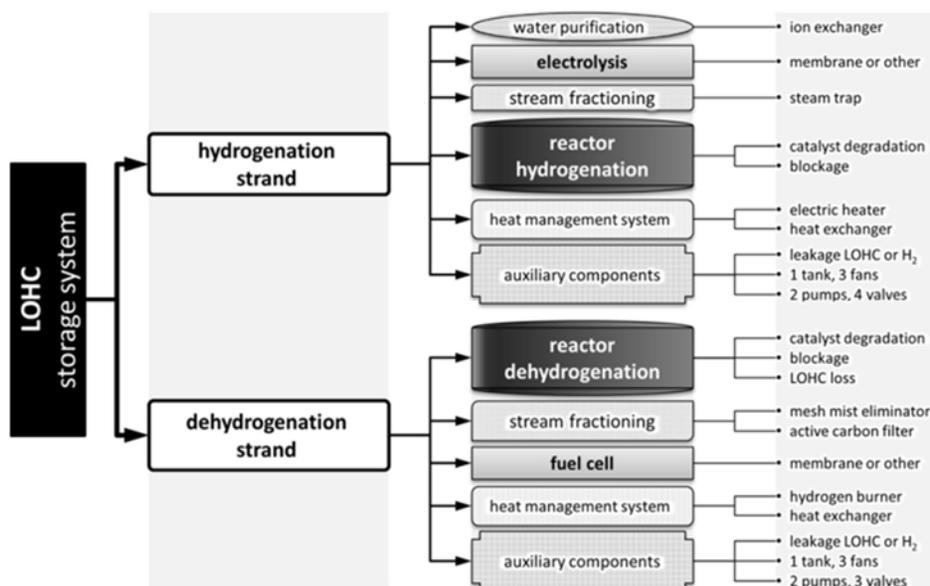


Abbildung 2: Einzelaggregate eines LOHC-Systems und ihre primären Ausfallursachen

2 TPJ 2: Effiziente Wasserstofflogistik

2.1 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.² 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 3: Foto des Reaktors für die direkt-elektrisch beheizte LOHC-Dehydrierung

Abbildung 3 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.

² 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

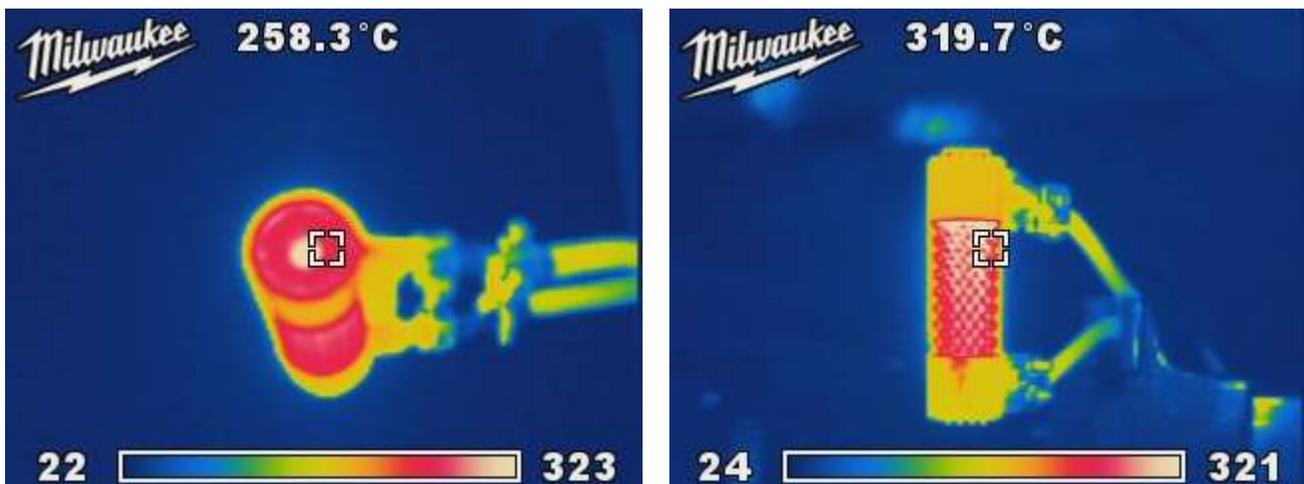


Abbildung 4: Darstellung der Temperaturverteilung in einem Heizelement aufgenommen mit einer Wärmebildkamera

Abbildung 4 zeigt die Temperaturverteilung in einem Heizelement für eine Kontaktierung mittels Klemmen. Es wird deutlich, dass die Temperatur insbesondere an den Kontaktierungsstellen am höchsten ist. Trotz eines großen Kabelquerschnitts und damit geringen Widerständen erwärmt sich auch die elektrische Leitung hin zur Struktur auf über 150 C. Es wird daher wichtig, die Leitungsverluste möglichst zu minimieren um den Wirkungsgrad der elektrischen Beheizung nicht unnötig zu verschlechtern.

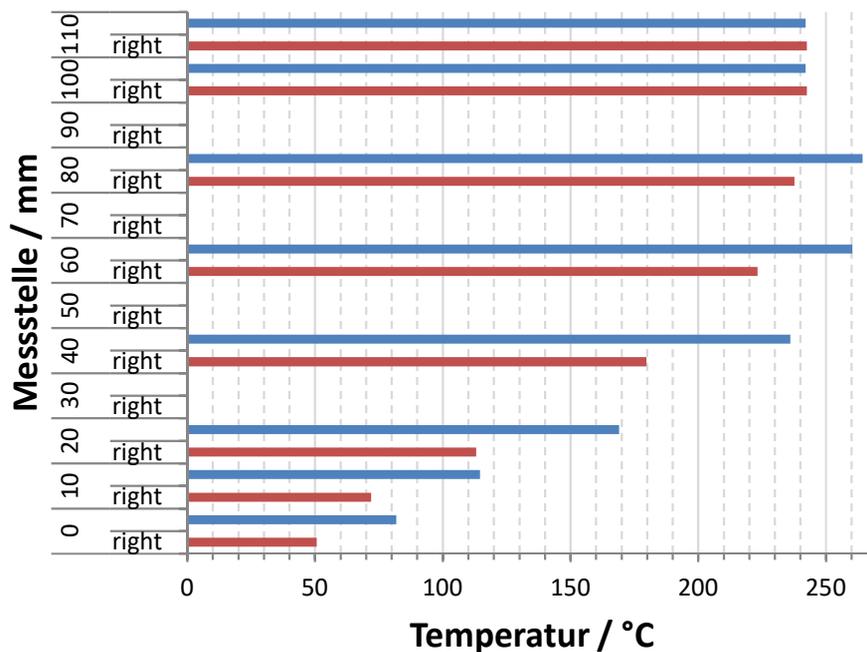


Abbildung 5: Darstellung des Temperaturverlaufs über die Höhe eines elektrischen Heizelements bei der Beheizung eines kalten LOHC-Stroms von 3,5 mL/min

In Abbildung 5 ist der Temperaturverlauf eines kalten H0-DBT-Stroms von 3,5 mL/min über die Höhe des additiv gefertigten Heizelements gezeigt. In diesem Fall ist die Struktur nicht katalytisch aktiviert und es wird ausschließlich die Erwärmung des Mediums betrachtet. Es wird deutlich, dass der Strom bevorzugt in der Nähe der Elektroden fließt und daher insbesondere im mittleren Teil der Struktur deutliche Temperaturunterschiede im strömenden Medium entstehen. Der elektrische Widerstand der Struktur ist zu niedrig, so dass der elektrische Strom einen bevorzugten Weg direkt von Strukturkontaktierung zu Strukturkontaktierung nimmt. Dieses Verhalten wird vermutlich durch das langsam strömende Medium verstärkt.

Grundsätzlich ist das Konzept einer direkten elektrischen Beheizung für die anspruchsvolle Dehydrierungsreaktion vielversprechend. Im kommenden Jahr soll der Wärmeeintrag weiter untersucht werden um anschließend die Dehydrierung mit katalytisch aktivierten Strukturen zu untersuchen.

2.2 Wärmeübertragungskompressor für die Vorwärmung von LOHC

Durch die Kompression von Gas auf hohe Drücke wird viel Wärme produziert. Diese wird im Fall von Schraubenkompressoren in ölüberfluteter Bauweise durch das Öl abgeführt. Daneben gibt es auch noch ölfreie Ausführungen. Ein öleingespritzter Schraubenkompressor befindet sich am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, der für diese Forschung für den Aufbau eines kleinen Vorversuchsstands verwendet wird. Der maximale Förderdruck dieses Kompressors beträgt 28bar, mit einer Temperaturbegrenzung von 75°C. Anstelle von Öl soll LOHC als Kühlflüssigkeit und als Schmiermittel verwendet werden. Da dieser Verdichter für die Verwendung von Wasserstoff nicht gasdicht genug ist, sind Stickstoff und Helium die geeignete Alternativen für die Vorversuche. Die Erfahrungen hieraus wird helfen, die Mischung von geladenem LOHC mit Gas zu untersuchen und herauszufinden, wie viel Wärme auf das LOHC übertragen wurde. Anschließend kann der Versuchsaufbau dann auf höhere Drücke und höhere Temperaturen skaliert werden. Aber dennoch sind diese Maschinen auf eine Temperatur von ca. 150°C und einen Druck von 50bar begrenzt. Für den Dehydrierungsprozess ist allerdings eine Temperatur von 280-320°C notwendig, die relativ hoch aber erreichbar ist.

Kolbenkompressoren bieten ebenfalls eine gute Lösung für diese Anwendung, denn durch diese Maschinen können sehr hohe Drücke erreicht werden. Die Beladung von Fahrzeugen in Wasserstofftankstellen erfolgt aktuell bei einem Druck von 700 bar. Da mit einer Steigerung dieser Druckstufe zu rechnen ist, ist unser Ziel die Verdichtung von Wasserstoff auf max. 1000 bar. In unserem Lehrstuhl wird ein erster Prototyp dieses Kompressors gebaut (siehe Abbildung 6). Derzeit arbeiten wir an der Fertigstellung der gesamten Anlage. Aufgrund der geringeren Komplexität dieser Maschine im Vergleich zur Schraubenmaschinen können wir die Wärmeübertragungsphänomene besser untersuchen und sogar bei hohen Temperaturen von bis zu 300 C arbeiten. Seine vertikale Form sorgt dafür, dass das LOHC immer nach unten an der Verdichter-Innenwand strömt, so dass ein Fall-Film entsteht, der den direkten Kontakt des Gases mit dem Metallgehäuse verhindert. Auf diese Weise wird die Wärme von Gas auf das LOHC übertragen. Nach der Verdichtung wird das LOHC gemeinsam mit dem Gas über ein Druckventil ausgestoßen, wodurch sich eine noch bessere Mischung der beiden Strömungen einstellt und Wärme übertragen wird. Um herauszufinden, wie sich das LOHC bei der Bildung des Fall-Films verhält und um die Menge an gepumpten LOHC besser zu definieren, wird außerdem ein Plexiglas-Kompressorraum gebaut.



Abbildung 6: Eine neue Art von Kolben-Wasserstoff Kompressor Prototype

Die Mitarbeiter, die in diesem Forschungsprojekt arbeiten, bestehen aus einem wissenschaftlichen Mitarbeiter - in diesem Fall Arian Shoshi - und zeitweise einer studentischen Hilfskraft. Eine enge Zusammenarbeit besteht mit den Teilprojekten von Prof. Grimm, Prof. Wasserscheid und Prof. Will. Da die Forschung an dem Kolbenkompressor auch von

Drittmitteln unterstützt wird, hat sie bereits im April 2016 begonnen und ist bereits fortgeschritten. Aufgrund des verspäteten Starts im Jahr 2017 hat sich der Anlagenaufbau um die Schraubenmaschine verzögert und wir konnten nicht das gesamte verfügbare Budget verwenden, das zugewiesen wurde.

2.3 Konzept zur direkten Beheizung eines LOHC-Freisetters mit einem Brenner

Aufbauend auf Arbeiten aus dem EnCN1 zur Reaktorentwicklung für LOHC-Speichersysteme wird im aktuellen Projekt der Fokus auf ein neuartiges Heizkonzept für die LOHC-Dehydrierung gelegt. Dabei wird die im Freisetzer benötigte Energie über eine direkte Beheizung mit einem Brenner eingebracht.

In Abstimmung mit dem Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) von Prof. Wasserscheid wird ein kombiniertes System aus Brenner und Wärmeüberträger für die Beheizung des Freisetzers entwickelt, dimensioniert, konstruiert und umgesetzt.

Im ersten Jahr wurden auf Basis bereits geleisteter Vorarbeiten am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) folgende Arbeitspakete durchgeführt: Basierend auf einer Literaturrecherche zur Wasserstoffspeicherung erfolgte die Erstellung eines Anforderungsprofils für eine LOHC-Dehydriereinheit. Weiterhin wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Brenner für die Auswahl des Brenners und die Konstruktion des modifizierten Freisetzers analysiert. Auf diese Weise erfolgte eine Charakterisierung und Klassifizierung einer Vielzahl an Brennerarten in der Literatur. In Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil wurde anschließend eine geeignete Kombination aus Brenner und Wärmeüberträger ausgewählt. Aufgrund der Vorteile einer flächigen Wärmeabgabe, einer variablen Gestalt der Brenneroberfläche, einem großen Modulationsbereich der Leistung und dem einfachen Aufbau fiel die Wahl auf einen Porenbrenner. Auf Basis dieser Informationen erfolgten die Erstellung mehrerer Konzepte für die direkte und indirekte Beheizung des Freisetzers und deren Bewertung. Abschließend wurde ein den Anforderungen entsprechender erster Prototyp der Dehydriereinheit bestehend aus einem methanbefeuerten Porenbrenner und einem Freisetzer im Detail konzipiert, dimensioniert und schließlich konstruiert. Ein Sicherheitskonzept für die Laboranlage wurde ausgearbeitet. Des Weiteren wurde ein Messkonzept zur Aufnahme von Temperaturen und Durchflüssen sowie eine Regelung des entwickelten Brenners erstellt.



Abbildung 7: Erster Prototyp einer LOHC-Dehydriereinheit mit einem Porenbrenner als Wärmequelle

Nach der Auswahl und Beschaffung der zuvor festgelegten Bauteile erfolgte der Aufbau einer ersten kleinskaligen Prototyp-Laboranlage. Zur Inbetriebnahme der Anlage wurden Messungen zur Bestimmung der Oberflächentemperaturen an der Verbrennungszone des Porenbrenners und im Freisetzer durchgeführt. Gemäß dem aktuellen Projektzeitplan wurde ein erster voll funktionsfähiger, kostengünstiger und skalierbarer Laboraufbau

entwickelt, mit dem die Charakterisierung der LOHC-Dehydriereinheit erfolgen kann. Der Prototyp ist in Abbildung 7 dargestellt. Eine direkte Beheizung des Freisetzers über einen Brenner wurde realisiert. Bedingt durch den modularen Aufbau und die einfache Gestaltung ist die Variation zahlreicher Parameter möglich. Im weiteren Projektverlauf wird die Anlage experimentell und simulativ optimiert und Tests mit hydriertem LOHC werden vorbereitet. Erste Aufheizuntersuchungen des LOHC-Mediums (nicht hydriert) mit direkter Beheizung zeigen vielversprechende Ergebnisse, insbesondere wird der erforderliche Temperaturbereich für die Dehydrierung erreicht.

Im weiteren Projektverlauf sollen umfangreiche Messreihen am ersten Prototypen durchgeführt werden. Außerdem ist die Variation von verschiedenen Einflussparametern sinnvoll, um den Aufheizvorgang besser zu verstehen und eine Datengrundlage für eine simulative Untersuchung des Wärmeübergangs zu schaffen. Anschließend fließen die gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung der Dehydriereinheit.

2.4 Thermochemische Energiespeicherung im LOHC Prozess

2.4.1 Einführung

Bei thermochemischen Energiespeichern wird Energie von einem chemischen Reaktionssystem in einem reversiblen endothermen Teilschritt gespeichert und kann bei Bedarf in einem exothermen Teilschritt wieder frei gesetzt werden. Dabei wird Energie als Wärme aufgenommen bzw. abgegeben. Somit lässt sich Energie z.B. aus Solarkraftwerken, aus der Abwärme industrieller Prozesse oder exothermer Reaktionen wie der LOHC-Hydrierung speichern. Wärme steht hier häufig bei hohen Temperaturen über 100 °C zur Verfügung, sodass ein Bedarf nach Speichern in diesem Temperaturbereich besteht.

Im Fokus dieses Projektes stehen Reaktionssysteme, welche auf Feststoffen basieren. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Systeme, die für dieses Teilprojekt besonders relevant sind.

Tabelle 1: Übersicht thermochemischer Energiespeicher

Reaktionssystem	Reaktionsgleichung	Anwendungsbereich
Calciumchlorid - Wasser	$CaCl_2 + n H_2O \rightleftharpoons CaCl_2 \cdot nH_2O + \Delta H_R$	< 200 °C
Magnesiumoxid - Wasser	$MgO + H_2O \rightleftharpoons Mg(OH)_2 + \Delta H_R$	250 - 350 °C

* bei einem H₂O- bzw. CO₂-Partialdruck von 1 bar

Dieses Projekt war bereits in der ersten Förderphase des EnCNs vertreten und wird nun in der zweiten Förderphase fortgeführt. Das Ziel ist die Entwicklung eines effizienten, langzeitstabilen Speichers mit einer hohen Speicherkapazität. Dazu werden die in Tabelle 1 genannten Materialien auf poröse Trägermaterialien aufgebracht, um den Wärme- und Stofftransport sowie die Zyklenstabilität zu erhöhen.

2.4.2 Ergebnisse aus dem Jahr 2017

Nach der Beladung von porösen Trägern mit den genannten Speichermaterialien entstehen Komposite, die sich in ihren Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden können. Im Rahmen unserer Forschung am EnCN soll dies genauer untersucht werden, um gezielt Kompositmaterialien für bestimmte Anwendungen herstellen zu können. In unserem Versuchsreaktor können wir die hergestellten Komposite entsprechend der Reaktionsgleichungen in Tabelle 1 hydratisieren bzw. dehydratisieren. Das Temperaturprofil während dieser Versuche ist in Abbildung 8a gezeigt. Der Reaktor ist mit kommerziell erhältlichen Aluminiumoxidextrudaten, die mit 30 Gew.-% CaCl_2 beladen sind, gefüllt.

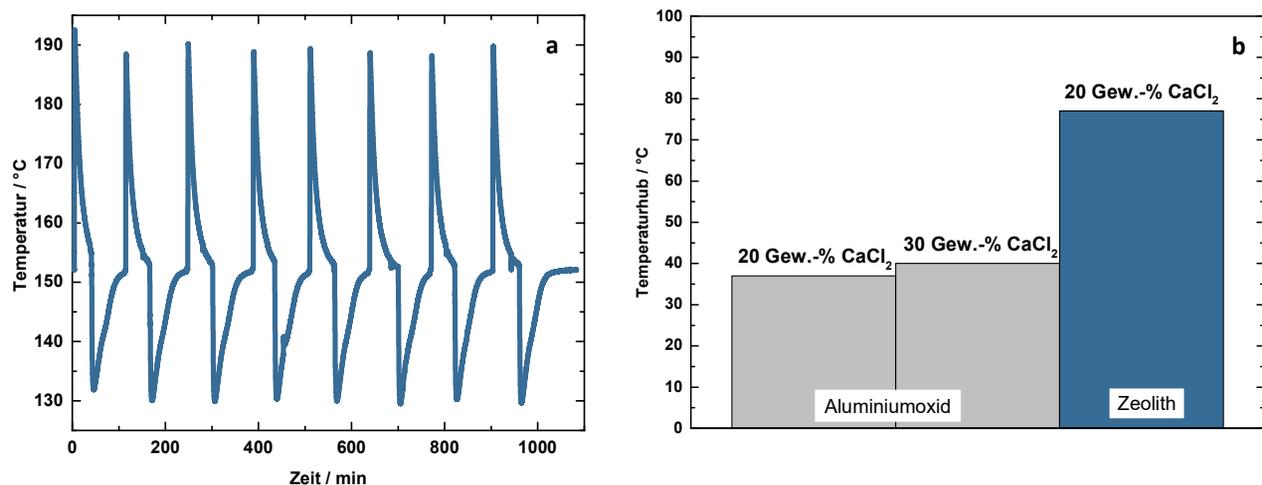


Abbildung 8: a) Temperaturprofil während Hydratisierungs- und Dehydratisierungszyklen von 30 Gew.-% CaCl_2 auf Aluminiumoxidpellets (Manteltemperatur d. Reaktors: 160 °C, Massenstrom H_2O zur Hydratisierung: 1 g min^{-1} , Volumenstrom N_2 zu Dehydratisierung: 200 ml min^{-1} ; b) Temperaturhub bei unterschiedlicher Beladung von Kompositmaterialien und bei Variation der Trägermaterialien.

Während der exothermen Hydratisierung mithilfe von Wasserdampf wird der thermische Speicher entladen, sodass die Temperatur im Reaktor ansteigt. Nach vollständigem Ablauf der Reaktion fällt die Temperatur im Reaktor wieder auf die Ausgangstemperatur zurück und die endotherme Dehydratisierung kann durch Einleiten eines trockenen Gasstromes herbeigeführt werden. Dabei sinkt die Temperatur im Reaktor. Durch mehrfaches Wiederholen dieser Be- und Entladezyklen kann die Zyklenstabilität des Materials untersucht werden. Die gleichmäßigen Temperaturprofile zeigen, dass dieses Kompositmaterial eine sehr gute Zyklenstabilität aufweist. Außerdem wurde die Beladung des Materials mit CaCl_2 variiert. Wie in Abbildung 8b zu erkennen ist, ändert sich dadurch der Temperaturhub während dem Entladen des Speichers nur leicht.

Wird anstelle von Aluminiumoxid Zeolith X als Trägermaterial verwendet, so kann ein etwa doppelt so hoher Temperaturhub erreicht werden. Das bedeutet, dass sich in einer technischen Anwendung auch Wärme auf einem höheren Temperaturniveau abgeben lässt. Im Vergleich zu Aluminiumoxid adsorbiert Zeolith X selbst sehr stark Wasser, sodass hier das Trägermaterial zusätzlich zu einer Temperaturerhöhung beiträgt. Allerdings muss der Speicher, der auf Zeolithen basiert, auch bei höheren Temperaturen aufgeladen werden. Dieses Beispiel zeigt, dass durch Kombination verschiedener Materialien die Anwendungsbereiche thermochemischer Speicher beeinflusst werden können.

2.4.3 Derzeitige Forschung und Ausblick

Mithilfe der Investitionsmittel, die im Rahmen der zweiten Förderphase zu Verfügung standen, wurde Ende 2017 eine STA (Simultane Thermische Analyse) mit Wassergenerator angeschafft. Mit diesem Messgerät können die hergestellten Speichermaterialien thermogravimetrisch und kalorisch unter Wasserdampfatmosfera untersucht werden. Die STA wird Anfang 2018 in Betrieb genommen und ergänzt unsere Laborausstattung, die in der ersten Förderphase aufgebaut wurde, in idealer Weise. Zudem bieten sich mit diesem Messgerät zahlreiche Kooperationsmöglichkeiten innerhalb und außerhalb des EnCNs.

Des Weiteren beschäftigt sich derzeit ein Masterarbeiter mit einer Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Wärmespeichertechnologien. Dazu wird die Methode des Life Cycle Assessments (LCA) verwendet. Dabei werden verschiedene Speicherkonzepte hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauchs sowie ihrer Auswirkung auf die Umwelt und die

menschliche Gesundheit untersucht. Unser Ziel ist es, Speichertechnologien zu entwickeln, die über ihren gesamten Lebenszyklus nachhaltig sind. Zur Erstellung von LCAs wurde eine Lizenz für die Hintergrunddatenbank ecoinvent aus Fördermitteln des EnCNs angeschafft.

2.5 Unterprojekt: Analyse der Wirtschaftlichkeit

Die enge Kooperation zwischen Ingenieuren und Wirtschaftswissenschaftlern im Teilprojekt 2 ermöglicht eine umfassende und präzise Analyse der Wirtschaftlichkeit der LOHC-Technologie und vergleichbarer Alternativen. 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 die möglichst spezifische technologische Entwicklung einer LOHC-betriebenen Wasserstoff-Tankstelle unter Berücksichtigung der Wasserstoffgewinnung, Bindung und Verteilung. In einem ersten Schritt wurde dazu die Prozesskette einer Tankstellenversorgung mit LOHC und anderen Electrofuels (Fischer-Tropsch-Diesel und Methanol) modelliert. Dafür mussten notwendige Systemkonfigurationen und relevante technische und wirtschaftliche Parameter für das Modelljahr 2035 identifiziert werden. Den Strompreisen kommt dabei eine große Bedeutung zu, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Electrofuels haben können. Die Preise für das Jahr 2035 konnten durch die im EnCN-Projekt EMD entwickelten Strommarktmodelle Grimm et al. (2016, 2017) simuliert und als exogene Vektoren übernommen werden.

Die Auswertungen des mathematischen Modells ergeben endogen die kostenminimalen Kapazitäten der beteiligten Komponenten (bspw. Elektrolyseure, Syntheseanlagen, Speichertanks). Daraus können sowohl Aussagen über das Design einer preissensitiven Prozesskette als auch Auslastungsgrade und notwendiges dynamisches Verhalten der Komponenten abgeleitet werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Strompreise und damit auch das Energiemarktdesign einen herausragenden Einfluss auf die Mobilitätskosten der untersuchten Elektrofuels haben (vgl. Abbildung 9)

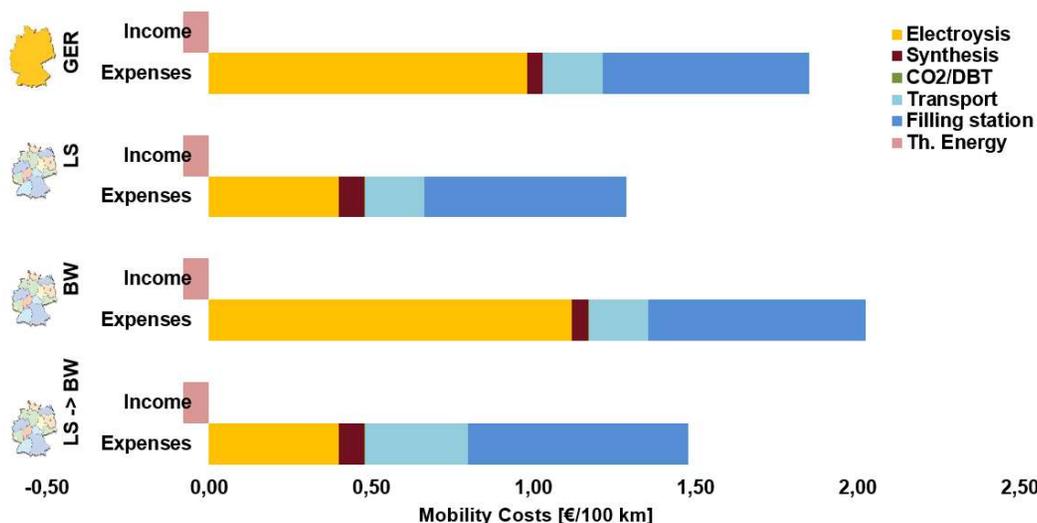


Abbildung 9: Vergleich der Mobilitätskosten eines Wasserstoffautos (Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle via LOHC) bei einem Energy Only Marktdesign (GER) und bei bundeslandscharfen Nodalpreisen für Niedersachsen (LS) und Baden-Württemberg (BW). Des Weiteren werden die Mobilitätskosten inklusive des Transports der Energieträger von Niedersachsen nach Baden-Württemberg (LS->BW) dargestellt.

Aufgrund des hohen Energiebedarfs der Synthese von Electrofuels kann die Produktion die Preisbildung am Strommarkt beeinflussen. Daher sollen in einem weiteren Schritt die Strompreise als endogene Variablen in das Modell einbezogen und die Auswirkungen auf die Produktionskosten der Kraftstoffe untersucht werden. 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.

Electrofuels können nicht nur als Kraftstoffalternative dienen, sondern auch als Langzeitenergiespeicher eingesetzt werden. Diese Möglichkeit wurde bereits in einer vom Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbes. Wirtschaftstheorie betreuten Masterarbeit (Runge 2016) untersucht und könnte in einem nächsten Schritt auf ein Modell mit endogenen Strompreisen angepasst werden.

- Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Dr. Jakob Albert, Prof. Dr. Veronika Grimm, Christian Sölch, Philipp Runge, Prof. Dr. Gregor Zöttl, Prof. Dr. Peter Wasserscheid
- Budget 2017: 84 000 €. Davon ausgeschöpft: Drei Monatsgehälter (TV-L E13 75 %) und ein Laptop. Restmittel: 72.120,06 €

3 TPJ 3: Effiziente Wasserstoffnutzung

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

Zur Dehydrierung des im LOHCs gespeicherten Wasserstoffs wird eine Wärme von 65 kJ je Mol Wasserstoff benötigt. Dies entspricht 26,9% des Heizwerts des freigesetzten Wasserstoffs. Bei einer Rückverstromung des Wasserstoffs mittels Verbrennungsmotoren stellt die anfallende Enthalpie im Abgas eine effiziente Möglichkeit dar, diese Wärme zur Verfügung zu stellen. In der Dehydrierung wird der Wasserstoff bei niedrigen Drücken von ca. 1 bar bis 5 bar freigesetzt. Die zur Verdichtung auf Einblasedruck benötigte Leistung muss in die Energiebilanz des Motors einbezogen werden. Dem Projekt vorangegangene Motormessungen haben gezeigt, dass ein wirkungsgradoptimal, mit reinem Wasserstoff betriebener Verbrennungsmotor nur etwa 15% der benötigten Enthalpie auf dem erforderlichen Temperaturniveau von über 300°C zur Verfügung stellen kann.

Aufgrund der aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt (Bavarian Hydrogen Center BHC) zur Verfügung stehenden Infrastruktur konnte das Teilprojekt ohne Zeitverzögerungen gestartet werden. Plangemäß wurde im Kalenderjahr 2017 die Grundvermessung mit reinem Wasserstoff durchgeführt und abgeschlossen. Der Wasserstoff wurde dabei mittels eines eigens entwickelten Niederdruck Direktinjektors direkt in den Brennraum eingeblasen. Bei den Versuchen mit reinem Wasserstoff werden aktuell zwei Extremfälle betrachtet: Zum einen wird der Motor wirkungsgradoptimal betrieben, zum anderen wird der Motor so betrieben, dass die Abgasenthalpie maximal ist. Im wirkungsgradoptimalen Betrieb wird der Motor mit einem Kraftstoff-Luft Äquivalenzverhältnis $\phi < 0,5$ betrieben (oben in Abbildung 10). Dabei können aus der Abgasenthalpie je nach Leistung des Motors zwischen 4% und 8% der dem Motor zugeführten Kraftstoffenergie zur Dehydrierung bereitgestellt werden. Bei der auf Abgasenthalpie maximierten Betriebsstrategie (unten in Abbildung 10) wird der Motor nahe dem stöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnis betrieben. Dadurch können zwischen 7% und 10% der zugeführten Kraftstoffenergie zur Dehydrierung bereitgestellt werden. Durch eine spezielle Einblase- und Zündstrategie (späte Verbrennung) wird eine weitere Steigerung auf ca. 12% angestrebt.

Im weiteren Projektverlauf wird für den Wasserstoff-Erdgas Mischbetrieb die Zusammensetzung des Gasgemisches so gewählt werden, dass die notwendige Dehydrierwärme für den Wasserstoffanteil vollständig aus der Abgasenthalpie gedeckt werden kann, wobei unterschiedliche Mischungsverhältnisse Wasserstoff/Erdgas betrachtet werden. Dieses Mischungsverhältnis ist neben seinem Einfluss auf die Energiebilanz der Dehydrierung ein wesentlicher Einfluss in den Betriebskosten von Blockheizkraftwerken. Der Wasserstoffanteil hat mit seinem Bereitstellungspreis erheblichen Einfluss auf das wirtschaftliche Potenzial der zu untersuchenden Anlage und stellt mit einer regenerativen Erzeugung einen direkten nachhaltigen Energieanteil dar. Über diesen zentralen Aspekt der nachhaltigen Energieversorgung hinaus verbessert die Wasserstoffzugabe die Verbrennung (Betriebsgrenzen und Wirkungsgrad) sowie die Emissionen von Erdgasmotoren (Stickoxide => Betriebslimitierung). Aus diesem Grund soll der Erdgas/Wasserstoff-Mischbetrieb für den Fall von regenerativ erzeugtem und in LOHC gespeichertem Wasserstoff in einem weiten Mischungsbereich untersucht werden. Die Messergebnisse werden Betriebsgrenzen, Wirkungsgrade und Emissionen für verschiedene Einsatzszenarien

liefern und eine technische und wirtschaftliche Beurteilung von BHKW mit Erdgas/regenerativen Wasserstoff-Mischbetrieb erlauben.

Ergänzend zu den motorischen Untersuchungen werden als Grundlagenuntersuchungen für künftige noch effizientere Brennverfahren Einblaseversuche in der Hochdruck Spraykammer durchgeführt, die Motorbedingungen bis 100 bar und 1000K darstellen kann. Dadurch sollen Potentiale neuartiger Gasbrennverfahren erforscht werden. Zu diesem Zweck wird aktuell ein Hochdruckgasversorgungssystem konzipiert und aufgebaut, das Erdgas und Wasserstoff mit bis zu 500 bar für die Einblaseversuche zur Verfügung stellen kann.

Der zentrale, das Projekt bearbeitende Mitarbeiter ist Alexander Durst. Er ist seitens des Teilprojekts zentraler Ansprechpartner für alle Belange. Je nach Anforderung der einzelnen Messtechniken, werden in einzelnen Projektabschnitten weitere Mitarbeiter hinzugezogen. Das Projekt ist im Teilprojekt 3 eng mit der Gruppe von Prof. Wasserscheid verzahnt. Diese nimmt jedoch planmäßig erst im zweiten Projektjahr die Arbeiten in diesem FSP auf. Bezüglich Drittmittelprojekten bahnen sich derzeit mehrere Kooperationen und Projekte, vor allem im Bereich Gasmotoren an.

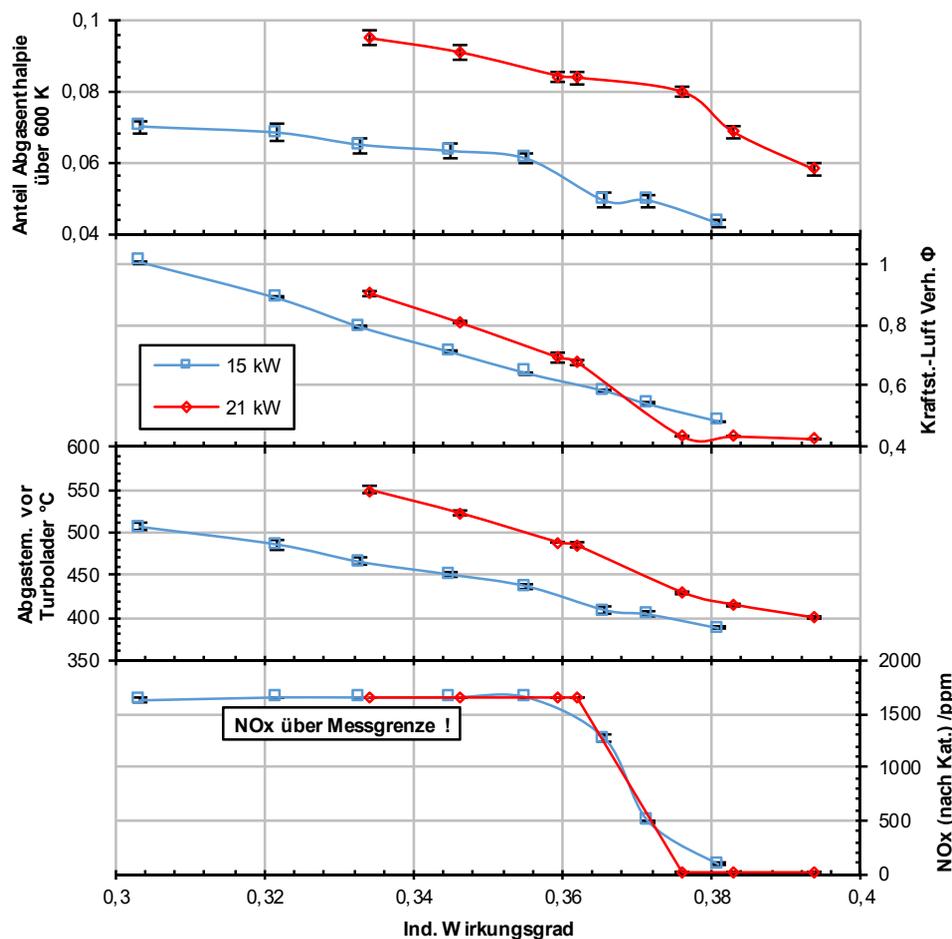


Abbildung 10: Betrieb des Wasserstoffmotors mit Niederdruck Direkteinblasung bei 15kW und 21kW effektiver Leistung und unterschiedlichen Betriebsstrategien.

4 Schlussworte

Das Projekt Speicher B ist gut in die zweite Förderphase gestartet. Ein Großteil der anvisierten Meilensteine konnte trotz eines leicht verzögerten Startes ins Jahr 2017 erreicht werden. Insbesondere das Teilprojekt 2: Effiziente Wasserstofflogistik ist von zunehmender Bedeutung und ergänzt das Kopernikus P2X-Projekt des BMBF an wichtigen Eckpunkten. 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.

5 Vorträge & Poster 2017

- [1] Patrick Preuster, Peter Wasserscheid. Towards a hydrogen-free hydrogen economy – Catalytic challenges in the catalytic hydrogenation and dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers. 2017, Vortrag auf European Fuel Cell Forum, Luzern, Schweiz
- [2] Richard Brehmer, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Peter Wasserscheid. Dynamic hydrogen supply for flexible power supply. 2017, Vortrag auf World Hydrogen Technology Conference, Prag, Tschechische Republik
- [3] J. Bollmann; L. Zigan; S. Will. Effiziente Wärmeversorgung eines LOHC-Dehydrier-Reaktors mit einem Brenner. EnCN Sommerkonferenz, 2017
- [4] P. Runge. Economic comparison of different electrofuels for energy scenarios in 2035. Interne EnCN Konferenz, 2017

6 Veröffentlichungen 2017

- [1] Timo Rüde, Andreas Bösmann, Patrick Preuster, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, Karsten Müller. Resilience of LOHC Based Energy Storage Systems. *Energy Technology*, 2017, DOI: 10.1002/ente.201700446
- [2] Jakob Albert, Patrick Preuster. Biogenic formic acid as a green hydrogen carrier. *Energy Technology*, 2017, DOI: 10.1002/ente.201700572
- [3] V. Grimm; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; K.G. Zöttl. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The effect of Market Splitting and Network Fee Regimes. *European Journal of Operational Research*, 2016
- [4] V. Grimm; K.G. Zöttl; C. Sölch. Regionalkomponenten bei der EE-Vergütung. Gutachten im Auftrag der Monopolkommission in Vorbereitung des 77. Sondergutachtens Energie2017 der Monopolkommission, 2017
- [5] P. Runge. Potential eines Stromspeichersystems auf Basis chemisch gebundenem Wasserstoffs für die deutsche Elektrizitätsversorgung im Jahr 2035, 2017

W1-Professur „Energieinformatik“

1 W1-Professur „Energieinformatik“

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Marco Pruckner (Informatik 7)

Die Besetzung der Juniorprofessur für Energieinformatik erfolgte bereits Anfang 2016 durch Herrn Dr.-Ing. Marco Pruckner. Im Jahr 2017 wurde eine Vielzahl von Projekten bearbeitet. So wurde im Auftrag des bayerischen Wirtschaftsministeriums ein Simulationswerkzeug für die zeitliche und räumliche Ausbauplanung für Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge erstellt [4]. Hierfür wurden Informationen der aktuell vorhandenen Ladeinfrastruktur in Bayern statistisch ausgewertet und eine diskrete Ereignissimulation erstellt. In Kooperation mit dem Fraunhofer UMSICHT erfolgte eine modellgestützte Analyse der flexiblen und effizienten Verwendung von Strom aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien für Busflotten im öffentlichen Personennahverkehr [2][5]. Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit der N-ERGIE IT GmbH ein IT-Sicherheitszonenkonzept für ein Querverbundunternehmen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Bereiche ÖPNV, Energie- und Wasserversorgung entwickelt. Bei der Entwicklung wurde insbesondere auf die Umsetzbarkeit des Konzepts innerhalb des Unternehmens geachtet. Im Bereich der Energiesystemanalyse erfolgte die Herleitung des Einsatzes regionaler KWK-Anlagen zur Deckung der lokalen thermischen Last und die daraus resultierende Ableitung der elektrischen Must-Run Leistung. Darüber hinaus wurden sowohl Top-Down als auch Bottom-Up Ansätze zur Herleitung der Residuallast im deutschen elektrischen Energieversorgungssystem untersucht.

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



ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854-9120
Fax: +49 911/56854-9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Unterstützt durch:



Gefördert durch:



Impressum

Redaktion/Herausgeber:
Energie Campus Nürnberg

Anschrift:
Energie Campus Nürnberg, Geschäftsstelle
Fürther Str. 250, „Auf AEG“, 90429 Nürnberg
Telefon: 0911 / 56854 9120
Fax: 0911 / 56854 9121
Mail: info@encn.de
www.encn.de

Gestaltung:
Energie Campus Nürnberg
Datenstand: 31.12.2017

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



**ENERGIE
CAMPUS
NÜRNBERG**

Fürther Str. 250
90429 Nürnberg
Tel.: +49 911/56854 - 9120
Fax: +49 911/56854 - 9121
Email: info@encn.de
www.encn.de

Partner:



Unterstützt durch:



Gefördert durch:

