



FORSCHUNGSBERICHT EnCN1 2011–2016

Grußwort



der Bayerischen Staatsministerin für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, Ilse Aigner, und des Bayerischen Staatsministers für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst, Dr. Ludwig Spaenle, für den Abschlussbericht des Energie Campus Nürnberg (EnCN)

Wir haben den Energie Campus Nürnberg (EnCN) als eine der zentralen strukturpolitischen Maßnahmen nach der Quelle-Insolvenz aus der Taufe gehoben, um die in Wissenschaft und Wirtschaft vorhandenen Kompetenzen der Region im Energiebereich zu stärken. Die Rechnung ist aufgegangen: Statt einer Industriebranche ist mit dem EnCN ein pulsierender Ort des öffentlichen Lebens entstanden. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten an der Verwirklichung der Vision einer nachhaltigen, auf erneuerbaren Energien basierenden Energiewirtschaft. Der EnCN ist eine Forschungsplattform, die in einem integrierten Ansatz alle Aspekte einer geschlossenen erneuerbaren Energiekette bearbeitet. Damit nimmt der EnCN deutschlandweit eine Vorreiterrolle ein und hat bereits Nachahmer gefunden.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor liegt in der Zusammenarbeit der Universität Erlangen-Nürnberg und der Technischen Hochschule Nürnberg, Fraunhofer-Einrichtungen und dem Zentrum für Angewandte Energieforschung Bayern. Alle forschen im Verbund und befeuern sich so gegenseitig, was sich auch an umfangreichen Drittmittelwerbungen zeigt. Durch die anwendungsorientierte Forschung haben Unternehmen in Kooperation mit dem EnCN die Möglichkeit, die entwickelten Produkte und Technologien direkt in den Markt zu bringen. Um diese initialen Erfolge zu sichern und die Investitionen der Aufbauarbeit in eine Erntephase zu führen, fördert die Bayerische Staatsregierung den EnCN für weitere fünf Jahre. Wir unterstützen damit die Überführung der ursprünglichen Strukturmaßnahme in eine Forschungs-Kooperation, die sich mittelfristig selbst trägt. Deshalb setzte die Weiterförderung auch ein streng wissenschaftliches Auswahlverfahren voraus.

Der EnCN hat die Entwicklungen der Energieforschung auf Bundes- und EU-Ebene und eine komplementäre landesweite Abstimmung mit den weiteren Zentren und Kompetenzen in Bayern im Blick, um die Bearbeitung der Forschungsfragen des gesamten, breiten Themenspektrums im Energiebereich zu gewährleisten. Mit der Weiterförderung wird die Region Nürnberg-Erlangen neben München der bayerische Energieforschungsstandort, der über wissenschaftliche Spitze sowie thematische Breite verfügt und von den Grundlagen bis zur konkreten Anwendungsforschung alles abdeckt. Wir erwarten weitere zahlreiche positive Rückkopplungen zwischen den einzelnen Institutionen. Es ist besonders erfreulich, dass die Hochschule Ansbach als Forschungspartner mit einem eigenen neuen Teilprojekt hinzukommt und die Bündelung der Kompetenzen in der Region komplettiert.

Mit ihrer Arbeit leisten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des EnCN mit ihren Forschungsteams einen wesentlichen Beitrag im Rahmen der Energiewende und damit zu einer unserer dringendsten Zukunftsaufgaben. Dafür wünschen wir auch in Zukunft großen Erfolg!

München, im Dezember 2016



Ilse Aigner

Bayerische Staatsministerin
für Wirtschaft und Medien,
Energie und Technologie



Dr. Ludwig Spaenle

Bayerischer Staatsminister
für Bildung und Kultus,
Wissenschaft und Kunst

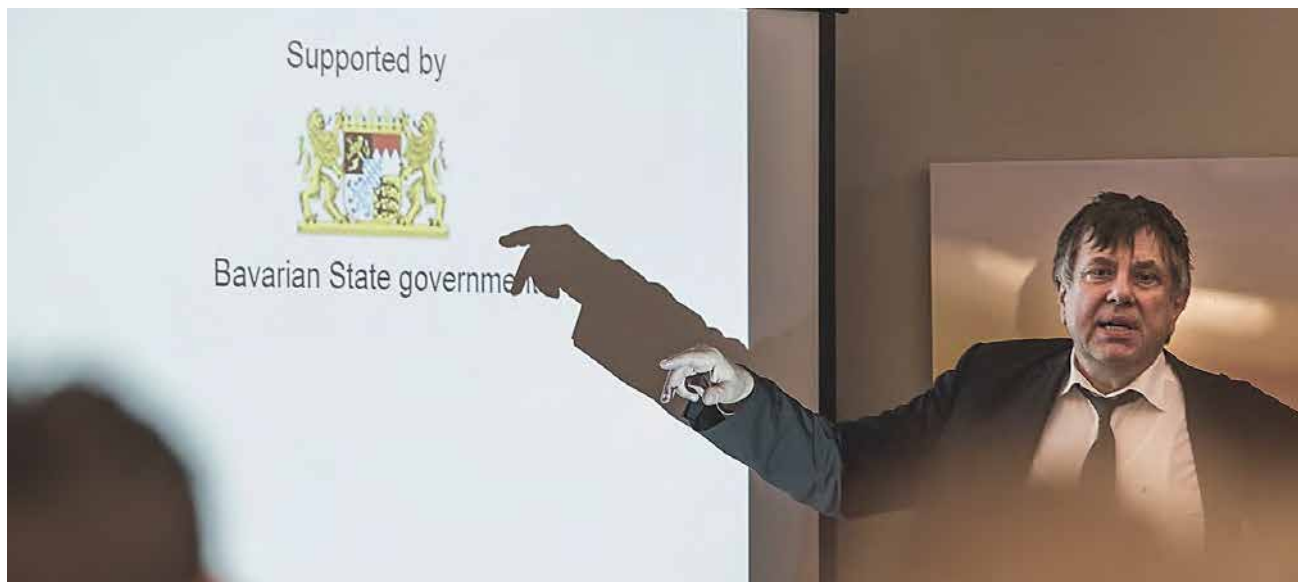
Gründungspartner:

Vorwort

durch Prof. Dr. Wolfgang Arlt

Gründungssprecher und Vorsitzender der Wissenschaftlichen Leitung, Professor an der FAU

Dies ist der letzte Jahresbericht der ersten Förderperiode des Energie Campus und somit auch ein Überblick, was in den letzten fünf Jahren erreicht wurde.



Die Projekte haben die wesentlichen Ziele erreicht. Durch diesen Erfolg gelang es, Drittmittel als weitere Finanzierungsquelle in Höhe von mehr als 35 Mio. € einzuwerben.

Die 2.Förderperiode, die am 1.1.2017 startet, definiert neue Ziele: die Aktivitäten im Bereich Speicher werden in zwei Teilprojekten fortgesetzt, so dass auch Ergebnisse aus dem separat geförderten Bavarian Hydrogen Center einfließen können. Das ebenfalls sehr erfolgreiche Energiemarktdesign wird verstärkt fortgeführt. Und die Aktivitäten aus dem Bereich Photovoltaik finden in den „Erneuerbaren Energieträger Technologien“ ihre erweiterte Heimat. Auch die Themenkomplexe „Energieeffiziente Gebäudehülle“ und „Energieeffiziente Antriebe“ werden im Projekt Effizienz mit veränderten Zielen weitergeführt.

Aktivitäten aus der 1.Förderperiode bleiben erhalten, die Fraunhofer Institute IIS und IISB betreiben ihre Labors mit verschiedenen Drittmittelprojekten, die aus dem EnCN entstanden sind, im Gebäude weiter. Dazu kommen Teile des bundesdeutschen Forschungsprogramms KOPERNIKUS (Projektleiter die Profs. Luther und Wasserscheid), die ebenfalls im Gebäude angesiedelt werden.

Somit geht der Energie Campus gestärkt die nächsten fünf Jahre an. Da eine zehnjährige Mietoption gezogen wurde, ist auch die räumliche Sicherheit für den EnCN gegeben.

Die Außendarstellung des EnCN's wurde wesentlich durch die internationale Tagung Isenec verstärkt, die an 2 Tagen in der Messe Nürnberg stattfand und 410 Teilnehmer und zahlreiche Firmenpräsentationen anzog.

Mit meiner Pensionierung im März 2018 soll auch mein Vorsitz der Wissenschaftlichen Leitung noch in 2017 zu Ende gehen. Es bleibt noch die Organisation der neuen Leitung mit den neuen Randbedingungen. Der nächste Jahresbericht wird folglich von meinem Nachfolger/meiner Nachfolgerin erstellt werden.

In einem Satz: die Energieforschung in Bayern ist ohne den EnCN nicht mehr denkbar.

Dezember 2016

Prof. Dr. W. Arlt

Vorsitzender der Wissenschaftlichen Leitung

Der EnCN in Zahlen



Im Fokus: Forschung und Entwicklung

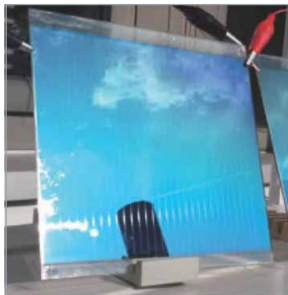
Um die Komplexität des Energiesystems in unserer Arbeit abzubilden, haben wir einen umfassenden Arbeitsansatz für unsere Forschung und Entwicklung gewählt. Wir arbeiten **ganzheitlich, interdisziplinär, institutionsübergreifend, vernetzt, unabhängig und flexibel**.

Diese Arbeitsweise erlaubt es dem EnCN, ein sehr breites Angebot zu entfalten. Wir können die komplette Forschungskette – von der strategischen Grundlagenforschung bis hin zur angewandten Entwicklung eines fertigen Produktes – anbieten.

Highlights

Erneuerbare Energien

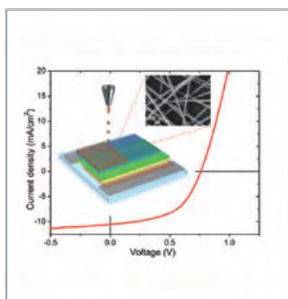
www.encn.de/EET



Gedruckte Organische Solarmodule

Durch den Einsatz von ultragenauer Laserstrukturierung mit Femtosekunden-Pulsen kann der in-aktive Verschaltungsbereich gedruckter organischer Solarmodule auf $\sim 100 \mu\text{m}$ reduziert werden. Die resultierenden Solarmodule weisen einen weltweit einmaligen Geometrischen Füllfaktor von über 98,5 % auf und eignen sich aufgrund ihrer überlegenen Ästhetik hervorragend für die Gebäudeintegrierte Photovoltaik.

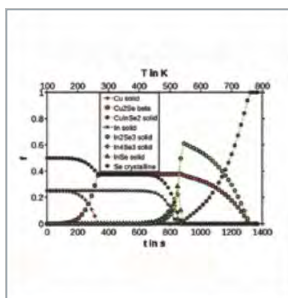
#EET



Inkjet Druck von Silbernanodrähten

Der Digitaldruck von Silbernanodrähten in industriellem Maßstab wird in der Solarfabrik erstmals demonstriert. Das Potenzial der so hergestellten semitransparenten Elektroden wird anhand vollständig Inkjet-gedruckter organischer Solarzellen gezeigt. Diese Zellen halten mit Wirkungsgraden von bis zu 4.3 % den Rekord in diesem Anwendungsgebiet.

#EET



Computersimulation CIS Schicht- und Phasenbildung

Das ist ein Beispiel für den berechneten Phasen- und Schichtbildungsprozess bei der Herstellung von CuInSe_2 Solarzellenabsorbieren. Die lokal auftretenden Phasen werden mithilfe einer Finite-Volumen Computersimulation der zugrunde liegenden Material-Diffusionsprozesse und der dabei auftretenden chemischen Reaktionen berechnet. Korngrenzen, welche unterschiedliche Phasen trennen, werden über einen zellulären Automaten erfasst.

#EET



Großflächige gedruckte Spiegel

Großflächige dielektrische Spiegel werden hergestellt und mit semitransparenten Solarmodulen kombiniert. Dieser Ansatz liefert eine Möglichkeit, die Effizienz zu erhöhen, ohne die Transparenz zu minimieren. Außerdem kann die Farbe der Module verändert werden, was zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten für die Gebäudeintegration eröffnet. Sowohl die Spiegel als auch die Solarmodule lassen sich durch kostengünstige Druckverfahren produzieren.

#EET

DENKEN. FORSCHEN. HANDELN.

Solarbilder

In organischen Photovoltaikzellen können sämtliche Schichten mittels Tintenstrahldruck in beliebigen Mustern und Schichtdicken hergestellt werden. Mit dieser Technik ist es möglich, „mehrfarbige“ Solarbilder kundenspezifisch zu erstellen. Dadurch ist der Weg zum digitalen Druck von Solarzellen geebnet.

#EET



Integration organischer Photovoltaik in Textilien

Im Bereich der Textilintegration entfaltet die organische Photovoltaik-Technologie ihr gesamtes Potenzial hinsichtlich Flexibilität, geringem Gewicht und überragender Designfreiheit. Durch die Integration in eine Jacke oder einen Rucksack ist es möglich, eine Energiequelle, z.B. als Smartphone-Ladestation, stets mit sich zu führen.

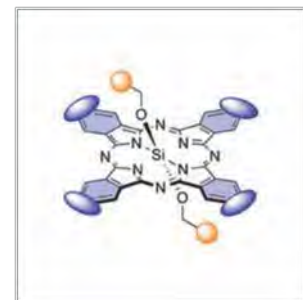
#EET



Wasserlösliche organische Halbleiter

Neuartige organische Halbleiter gewährleisten verbesserte Lichtabsorption und effektiveren Ladungstransport und damit eine Effizienzsteigerung in organischen Solarzellen. Durch ihre Wasserlöslichkeit können die organischen Halbleiter einfacher und umweltfreundlicher in den Solarzellen fixiert werden.

#EET



Rolle-zu-Rolle-Druck flexibler Solarmodule

Mittels Rolle-zu-Rolle-Druck lassen sich Solarmodule verschiedenster Technologien kostengünstig und umweltfreundlich herstellen. Die von uns betriebene Drucklinie wurde speziell für die Herstellung von Kleinserien entwickelt.

#EET



Highlights

Erneuerbare Energien

www.encn.de/EET



Wasserstoffspeicher

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) sind eine sichere und einfache Methode, Energie in Form von Wasserstoff über lange Zeit in einem Speicher vorzuhalten. Wasserstoff wird durch eine chemische Reaktion an das Speichermolekül gebunden und kann drucklos und bei Umgebungstemperatur problemlos gelagert und transportiert werden. Die Freisetzung erfolgt durch eine katalysierte Reaktion je nach Bedarf. Die Technologie ist bei großen Speichervolumina kostengünstig einsetzbar. Zur Demonstration wurde ein Wasserstoffspeichermodell gebaut.

#EET



Reaktoren und Prozessauslegung zur SNG Erzeugung

Die Erzeugung von synthetischem Erdgas (SNG) aus Synthesegasen stellt einen Ansatz zur großskaligen und langfristigen Speicherung regenerativer Energie dar. Besonderer Mehrwert ergibt sich, wenn die Reaktoren sowie Prozesse zur SNG-Erzeugung dynamisch und eduktflexibel betrieben werden können. Hierzu leisten wir mit unseren innovativen Reaktorkonzepten und Prozessketten für dezentrale Anwendungen einen Entwicklungsbeitrag.

#EET



Hochtemperaturwärmespeicher für LOHC-Systeme

Es wurde ein Hochtemperaturwärmespeicher für die Wasserstofffreisetzung mit LOHC-Systemen entwickelt. Dieser Speicher basiert auf der Oxidation von Eisen mit Wasser zur Wärme-freisetzung. Bei dieser Reaktion wird zusätzlich Wasserstoff freigesetzt, der z.B. in Brennstoffzellen genutzt werden kann. Durch diesen Speicher kann die entstehende Wärme im LOHC Prozess wieder genutzt werden. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Wasserstoffspeichersystems erhöht. Der Wärmespeicher kann Temperaturen von bis zu 450 °C bereitstellen.

#EET



Spitzenlastfähige CaO – CaCO₃ Hochtemperaturspeicher

Isotherme Hochtemperaturspeicher für Einsatztemperaturen im Bereich 800 – 900 °C auf Basis von CaO –CaCO₃ Systemen bieten höchste Speicherdichten und erlauben beispielsweise die Flexibilisierung der Dampferzeugung in der bestehenden Kraftwerksinfrastruktur.

#EET

Batterierieüberwachung mit dezentraler Batterieelektronik

Mit diesem Konzept enthält jede Zelle seine Überwachungselektronik. Die Zellspannungen werden über einen kapazitiv gekoppelten Bus an ein zentrales Batteriemangement übertragen. Damit ist der Modulaufbau viel flexibler und modular. Der Kontaktierungsaufwand ist stark reduziert.

#Elektrischer Speicher



Neues E-Fahrzeug-Batteriemodul mit hoher Energiedichte und kostenoptimierter Monitoring-Elektronik

In einem internationalen Projekt wurde ein komplett redundantes Batteriesystem, inklusive Regelalgorithmen, für ein Elektrofahrzeug entwickelt. Das Batteriemodul entstand zusammen mit Dräxlermaier (Deutschland), Panasonic (Japan) und IFEVS (Italien). Eingesetzt wird es in dem in Turin auf der Parco Valentino Car Show vorgestellten E-Fahrzeug-Prototyp.

#Elektrischer Speicher



Konstruktion einer Speicherstation

In einem internationalen Projekt wurde ein komplett redundantes Batteriesystem, inklusive Regelalgorithmen, für ein Elektrofahrzeug entwickelt. Das Batteriemodul entstand zusammen mit Dräxlermaier (Deutschland), Panasonic (Japan) und IFEVS (Italien). Eingesetzt wird es in dem in Turin auf der Parco Valentino Car Show vorgestellten E-Fahrzeug-Prototyp.

#Elektrischer Speicher



foxBMS – free, open, flexible Battery-Management-System

Ein neuartiges Konzept für ein Batterie-Management-System (BMS) wurde implementiert. Es wurde sowohl von Hardware- als auch Software-technischer Seite modular entwickelt, um auf zukünftige Entwicklungen und Anforderungsänderungen flexibel und schnell reagieren zu können. Durch das Offenlegen der Entwicklungsdokumente wird eine Gemeinschaftsentwicklung angestrebt.

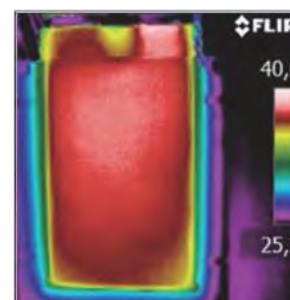
#Elektrischer Speicher



Kurze Simulationszeiten für thermisch-elektrische Simulationen von Batteriesystemen

Im Entwicklungsprozess für das thermische Design eines Batteriespeichers auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen wurde ein verbesserter Simulationsfluss entwickelt. Die Simulationszeit von gekoppelten thermisch-elektrischen Simulationen konnte um einen Faktor 1600 verringert werden. Sie ermöglicht dadurch die Gesamtsimulation eines Batteriemoduls oder Batteriepacks.

#Elektrischer Speicher



Highlights

Elektrische Netze

www.encn.de/Netze



Innovative Aufbaukonzepte für Leistungshalbleitermodule

Für modulare Multilevel-Umrichter wurde ein neues Modulkonzept mit speziell abgestimmter Aufbau- und Verbindungstechnik entwickelt und qualifiziert. Dies ermöglicht, die Leistungsfähigkeit insbesondere der Halbleiter vollständig auszuschöpfen und z.B. die Überlastfähigkeit der eingesetzten Bauelemente zu erhöhen. Eine besondere Herausforderung besteht hierbei auch in den hohen Lebensdauernanforderungen für energiewirtschaftliche Anwendungen mit Einsatzdauern von über 40 Jahren.

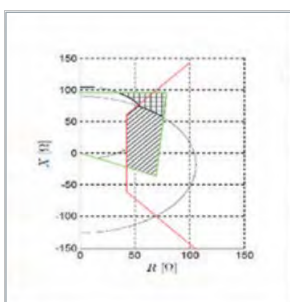
#Netze



Netzanbindung von unterschiedlichen Speichertechnologien

Modulare Multilevel-Umrichter (MMC) sind für die Netzanbindung volatiler Energieeinspeisungen und Speichereinheiten unterschiedlicher Technologien geeignet, die im Lastfolgebetrieb arbeiten. Eine neuartige Netzstruktur mit Speichereinheiten im kW-Bereich konnte nun erstmals im Labor aufgebaut und deren Funktion durch umfangreiche Messungen bestätigt werden. Zudem konnten die Messungen die neu entwickelten Algorithmen für ein hochflexibles Lademanagement der Speichereinheiten verifizieren.

#Netze



Hohe Netzauslastung bei hoher Netzsicherheit

In different fields, new adaptive protection algorithms as well as methods of automated protection coordination have been developed. These approaches allow to increase the grid loading during a high degree of grid security. By the way, the transient grid stability can be increased by application of the developed algorithms, as grid faults will be detected and cleared selectively and fast.

#Netze



SWARM – Storage With Amply Redundant Megawatt

Für die N-ERGIE AG und Caterva GmbH wird das Zusammenspiel zwischen Energiesystemen und Speichern hinsichtlich des stationären Betriebsverhaltens in Verteilnetzen und der Frequenzstabilität in Übertragungsnetzen untersucht. Mittels Netzberechnungen werden dabei die Wechselwirkungen zwischen Speichern und Stromnetz simuliert und anhand von Messungen überprüft. Es wird untersucht, in welchem Maße sich der Einsatz von Speichersystemen auf den künftigen Umfang von Netzausbaumaßnahmen in Verteil- und Übertragungsnetzen auswirken können.

#Netze

Neuartiger Kabelmesswagen zur Kabeldiagnose im Verteilnetz

In Kooperation mit einem großen deutschen Netzbetreiber und einer international tätigen Diagnosefirma wurde ein neuartiges und einzigartiges mobiles Mess- und Prüfsystem mit hochauflösenden Hard- und Softwarekomponenten zur Erfassung wichtiger diagnostischer Kenngrößen von 20kV-Mittelspannungskabeln entwickelt. Die Feldmessungen können Hinweise auf den Alterungszustand bestimmter Kabelstrecken liefern und einen Beitrag zur Sicherheit des Netzbetriebes leisten.

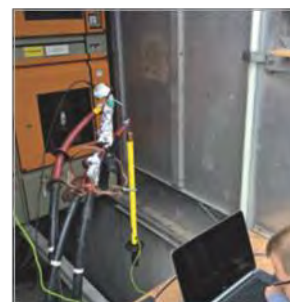
#Netze



Erste orts aufgelöste Evaluierungsdaten von Energieversorgungskabeln

In Zusammenarbeit mit einem im Diagnosebereich führenden Unternehmen wurde ein neuartiges Verfahren zur zerstörungsfreien orts aufgelösten Diagnose von Kabelsystemen entwickelt. Das zwischenzeitlich patentierte Verfahren erlaubt es, erstmalig die für den zuverlässigen Betrieb der Netze äußerst wichtigen dielektrischen Eigenschaften orts aufgelöst darzustellen. Kabelsegmente können dadurch vor einem möglichen Ausfall identifiziert werden.

#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



Antifuse – Überbrücken defekter Batteriezellen

Ein neues Bauelement zum Überbrücken defekter leistungselektronischer Komponenten wurde entwickelt und eine Reihe von Erfindungsmeldungen eingereicht. Dieses neuartige Bauelement kann innerhalb weniger Millisekunden einen niederohmigen Kurzschluss erzeugen und eröffnet somit einen Stromweg vorbei an defekten Bauelementen. Dies ist für Reihenschaltungen wichtig, wie sie in den Lithium-Ionen-Batteriesystemen oder bei HGÜ-Anlagen auftreten. Hiermit wird einem Totalausfall des Systems vorgebeugt.

#Netze



Hocheffiziente berührungslose Ladesysteme für Elektrofahrzeuge

Für das induktive Ladesystem konnten Übertragungswirkungsgrade von bis zu 97% erreicht werden, bei einer gleichzeitig hohen Leistungsdichte der Spulen und Übertragungsleistungen bis 3,5kW. Darüber hinaus ist die Integration eines niederratigen und robusten Informationsübertragungskanal innerhalb des Spulensystems gelungen. Hiermit können die vorhandenen Übertragungsspulen verwendet und es kann auf zusätzliche Funkmodule verzichtet werden. Auf diese Weise können auf Basis einer Nahfeldkommunikation wichtige Statusinformationen des Ladevorgangs übertragen werden.

#Netze



Highlights

Energiemanagement-Technologien

www.encn.de/EMT



OGEMA 2.0 ist ein Open Source Framework für Energiemanagementsysteme

Das javabasierte Framework ist quelloffen und kann auf unterschiedlichster Hardware eingesetzt werden. Es unterstützt die Programmierung individueller Applikationen, etwa zur Abbildung der Energieverbräuche, variabler Strompreise, Wetterprognosen, Präsenzmeldungen oder physikalischer Parameter wie Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit. OGEMA 2.0 bietet eine App-basierte Plattform mit integriertem Sicherheitskonzept.

#EMT



Leistungsmesssystem für Großverbraucher

Ein mit der Rauschert GmbH entwickeltes Leistungsmesssystem für elektrische Großverbraucher ist serienreif und VDE zertifiziert. Das System nutzt eine ringförmige Anordnung der Sensoren um den Leiter. Sie erzielen eine hohe zeitliche Auflösung, eine bessere Überstromfestigkeit und haben einen hohen Dynamikbereich. Mit einem Messdorn wird zusätzlich zum Strom auch die Spannung gemessen. Das System wurde mit dem Anerkennungspreis - Energy Efficiency Award 2016 der dena ausgezeichnet.

#EMT



Drahtlose IoT-Technologie für Energiemanagement

Durch die drahtlose Funktechnologie MIOTY lassen sich auf Arealen von mehreren Kilometern Sensoren kostengünstig abfragen. Durch die große Anzahl von mehr als 1 Million Sensoren und die Laufzeit von bis zu 10 Jahren entstehen speziell im Energiemanagement aber auch rund um Industrie 4.0 neue Anwendungen und Geschäftsmodelle. MIOTY ist flexibel einsetzbar und für die ersten Installationen in den neuen Anwendungen stehen spezielle Evaluation Kits zur Verfügung.

#EMT



Optimale Planung von Gastransportnetzen

Dem effizienten Transport von Erdgas durch Rohrsysteme wird zukünftig eine besondere Bedeutung zukommen. Dabei sind Fragestellungen der Integration von Marktmechanismen und der Kopplung verschiedener Energieträger, wie Strom und Gas, durch Power2Gas-Techniken von großem Interesse. Dank neuer mathematischer und algorithmischer Entwicklungen ist es möglich, für die Praxis sehr wichtige Planungs- und Steuerungsprobleme auf Netzen nationaler Größenordnung optimal zu lösen.

#EMT

DENKEN. FORSCHEN. HANDELN.

Simulation of smart energy systems

Mithilfe des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy können vernetzte intelligente Energiesysteme mit vielen konventionellen und erneuerbaren Energiewandlungseinheiten schnell nachgebildet und simuliert werden. Dazu werden Verbraucher-, Wetter- und Steuermodelle als auch Energie- und Kostenflüsse abgebildet. Aufgrund der Basisdaten können Hausmodelle erstellt und zu Verbänden mit einem gemeinsamen Wettermodell und einem Kommunikationsnetz gekoppelt werden. Dies ermöglicht z.B. die Untersuchung von Betriebsstrategien dezentraler Batterien.

#Simulation



Energiesystemanalyse

In Kooperation mit dem Bayerischen Wirtschaftsministerium und zahlreichen Unternehmen der Energiewirtschaft wurden mittels Simulation und Optimierung die Auswirkungen möglicher Handlungsoptionen in Bayern auf die Energiebilanz, den Energieeinsatz und die Umwelt aufgezeigt. Dazu wurden die wichtigsten Komponenten des Energiesystems technisch und wirtschaftlich nachgebildet und stark fluktuierende Erzeuger und deren Zusammenspiel mit Kraftwerken und Speichern modelliert. Die Arbeit wird im BMWi geförderten Projekt ‚KOSiNeK‘ fortgeführt.

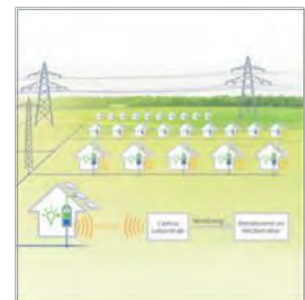
#Simulation



SWARM - simulation of distributed storage systems

In Kooperation mit der N-ERGIE AG und Caterna GmbH wurde im Projekt SWARM ein virtueller elektrischer Großspeicher installiert. Wir entwickelten dafür das Simulationsmodell eines Klein-speicher-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. Außerdem konnten so innovative Steueralgorithmen sowohl für die einzelnen als auch für den virtuellen Speicher erprobt und bewertet werden.

#Simulation



Showcase electromobility "e-NUE"

Das Projekt e-NUE befasst sich mit Elektromobilität und deren Auswirkung auf das Energiesystem. Es wurde ein Simulationsframework zur Analyse der Effekte der Elektromobilität, wie Stromverbrauch, Ladezeit oder CO₂-Emission, entwickelt. Mit diesem Tool können technische und wirtschaftliche Ergebnisse für die Elektrifizierung geschäftlich genutzter Fahrzeugflotten analysiert, bewertet und optimiert werden.

#Simulation



Highlights

Effiziente Energienutzung

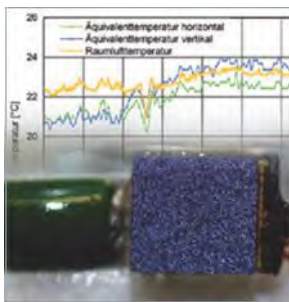
www.encn.de/Effizienz



Markteinführung eines neuen Zeolith-Adsorptionskälteaggregats

In enger Zusammenarbeit mit der SorTech AG, wurde ein neues Zeolith-Adsorptionskälteaggregat erfolgreich auf dem Markt eingeführt. Grundlegend dafür war die Entwicklung eines optimalen Verbundes zwischen einem leistungsstarken Adsorbens durch direkte Aufkristallisation und einem Verwachsen der Adsorbenschicht mit dem Trägermaterial. Durch diese innovative Beschichtung des Aggregates mit Zeolith konnte eine höhere Leistung erzielt werden.

#Gebäude



Behaglichkeitssensor für die Gebäudeautomation

Zur Erfassung der thermischen Behaglichkeit, vor allem auch in Bezug auf Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit, wurde ein miniaturisierter Äquivalenttemperatursensor entwickelt und an die Funkprotokolle EnOcean und ZigBee angebunden. Mithilfe des Sensors können künftig technische Gebäudesysteme, wie Heizung oder Jalousie, anhand eines realistischen Messwerts zur thermischen Behaglichkeit geregelt werden.

#Gebäude



Modell- und datenbasierte Regleroptimierung der Gebäudeausrüstung

In der passgenauen Einstellung von Systemparametern der technischen Gebäudeausrüstung liegt ein hohes Energieeinsparpotenzial. Dazu werden, je nach Anforderung, verschiedene Ansätze basierend auf vereinfachten linearisierten physikalischen Modellen oder Messdaten aus dem Betrieb verwendet. Um den Aufwand an Messdaten zu minimieren, können auch statistische Modelle verwendet werden, deren Unsicherheit in das Modell miteinbezogen wird.

#Gebäude



Informationsmodell für die Gebäudeautomation zur Fehlererkennung

Mithilfe von Algorithmen können aus Gebäudebetriebsdaten fehlerhafte Einstellungen in technischen Systemen erkannt und identifiziert werden. Dazu sind umfassende Informationen zur Anlagentechnik, deren Betriebsweise und Verknüpfung zu den Messdaten anhand der Datenpunkte notwendig. Mithilfe eines semantischen Informationsmodells lässt sich der Prozess der Fehlererkennung automatisieren. Es erlaubt explizit die Regelungslogik einer Gebäudeautomationslösung und dessen Einbindung in das Gesamtsystem abzubilden.

#Gebäude

Herzo Base Energiespeicherhäuser: Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen

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

#Gebäude



Emulationsprüfstand für thermische Erzeugungseinheiten und Speichersysteme

Der entwickelte permanenterregte hochpolige Synchronmaschine ist gut für den Teillastbereich geeignet und kommt ohne Getriebe und Schleifringe aus. Die Maschine verfügt über eine hohe Drehmomentdichte und guten Wirkungsgrad auch bei kleineren und mittleren Drehzahlen. Durch den Frequenzumrichter ist es möglich, die Maschine in einem großen Drehzahlbereich zu betreiben.

#Gebäude



Permanenterregte Synchronmaschine als Generator für Kleinwasserkraftwerke

Die entwickelte permanenterregte hochpolige Synchronmaschine ist gut für den Teillastbereich geeignet und kommt ohne Getriebe und Schleifringe aus. Die Maschine verfügt über eine hohe Drehmomentdichte und guten Wirkungsgrad auch bei kleineren und mittleren Drehzahlen. Durch den Frequenzumrichter ist es möglich, die Maschine in einem großen Drehzahlbereich zu betreiben.

#Industrie



Effizienzsteigerung bei Förder- und Hubanlagen

Bei Förder- und Hubanlagen, wie zum Beispiel Aufzügen oder Regalbediengeräten, kann die Effizienz des Systems durch Rückspeiseeinheiten sehr stark erhöht werden. Dadurch kann die in der bewegten Masse der Anlage vorhandene potentielle Energie beim Absenken wieder in elektrische Energie gewandelt und in das Stromnetz zurückgespeist werden. Der Schwerpunkt der Forschung liegt bei der optimalen Betriebsführung. Dadurch können Wirkungsgradverbesserungen im zwei-stelligen Prozentbereich erzielt werden.

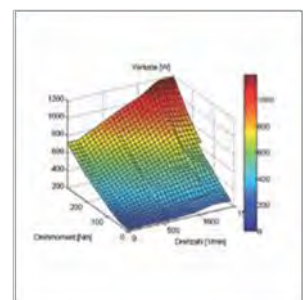
#Industrie



Verlustkennfelder beschleunigen die Antriebssimulation

Die Erforschung der Verlustmechanismen in elektrischen Maschinen und Antrieben liefert Erkenntnisse zur Modellierung der Verluste. Durch den Einsatz von Verlustkennfeldern konnten die Simulationen von Antrieben um einen Faktor 1000 beschleunigt werden. Dies ermöglicht eine genaue energetische Analyse und Optimierung auch von komplexen Antriebssystemen über längere Betriebszyklen hinweg.

#Industrie



Highlights

Energiemarktdesign

www.encn.de/EMD



Investitionsanreize und Geschäftsmodelle im Strommarkt

Das Gutachten für die N-ERGIE AG untersucht, ob der notwendige Netzausbau durch dezentrale Lösungen in der Stromversorgung reduziert werden kann. Berücksichtigt wurde dabei die Nutzung von Speicheranlagen, alternative Standorte für erneuerbare Energien, ein optimales Einspeisemanagement sowie Redispatch-Maßnahmen bei der Netzausbauplanung.

#Markt



Geschäftsmodelle im Smart Grid

Die in Zusammenarbeit mit dem Projekt „Smart Grid Solar“ weiterentwickelte, integrierte Netz- und Marktmodellierung analysiert das Zusammenspiel von Netzen, Erzeugern, Speichern und Verbrauchern bei der Planung von Smart Grids und zeigt auf, welche Marktregeln zusammen mit den wirtschaftspolitischen Steuerungsmechanismen zu sinnvollen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure am Markt führen.

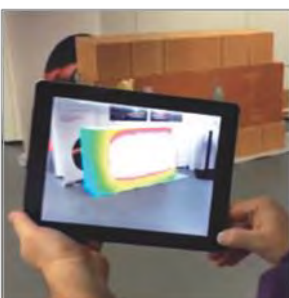
#Markt



Investitionsentscheidung in Kleinspeichern

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.

#Markt



Augmented Reality zur Darstellung von Energieflüssen

Die Projektion von Wärmeemissionen auf die Oberfläche von 3D-Rekonstruktionen können mittels Augmented Reality abgerufen werden. Dies erlaubt die Darstellung von Energieflüssen direkt in der Anwendungsumgebung, und kann z.B. im Gebäudesanierungssektor helfen, Schwachstellen zu identifizieren und effizientere Lösungen zu finden.

#Markt

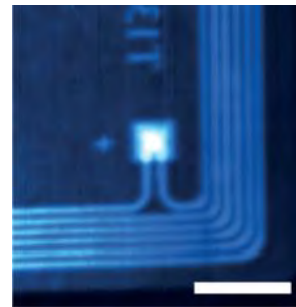
Highlights

Professuren

Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

Perovskite als Röntgendetektoren

Lösungsprozessierte Perovskite sind ein kostengünstiges und vielversprechendes Materialsystem, welches vor allem für die Herstellung von Solarzellen untersucht wird. Am EnCN wurde gezeigt, dass die gleichen Materialien auch für die Röntgendetektion eingesetzt werden können, so wie sie in der Medizin oder auch für die Materialforschung benötigt wird. Diese Detektoren ermöglichen Einsichten, welche dem Auge ansonsten verborgen bleiben (Das Bild zeigt einen elektronischen Schaltkreis mit einer Antenne, die für das Auge unersichtlich in einer Plastikkarte verborgen sind).



Energieeffiziente Produktionstechnologien

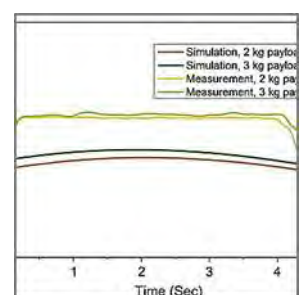
Emulationsprüfstand für thermische Erzeugungseinheiten und Speichersysteme

Mithilfe des eingeführten Energiemonitoringsystems kann künftig aus der Datenfülle der Energieverbräuche (Big Data) eigenständig ein Mehrwert (Smart Data) für die Nutzer generiert werden. Der geringe Handhabungsaufwand ermöglicht dabei den Anwendern, den Fokus rein auf die Nachvollziehbarkeit der getätigten Fahrweise und des sich daraus ergebenden Energieverbrauchs zu legen. Dies fördert nicht nur das Verständnis im Umgang mit Energie, sondern erlaubt auch eine verursachungsgerechte Zuordnung der energiebezogenen Leistung am Lehrstuhl sowie die Demonstration und Weiterverwendung der Ergebnisse für Lehrveranstaltungen und Praktika.



Permanenterregte Synchronmaschine als Generator für Kleinwasserkraftwerke

Die Modellierung mechatronischer Handhabungssysteme mit Hilfe von Modelica und die anschließende Simulation des Energieverbrauchs ermöglicht die Berücksichtigung des Faktors Energie bereits zum Zeitpunkt der Auslegung einer Produktionszelle. Damit können frühzeitig Optimierungsmaßnahmen angestoßen und im Rahmen einer Bewertung alternativer Produktionsverfahren umgesetzt werden.



Inhaltsverzeichnis

Grußwort.....	0
Vorwort	2
Der EnCN in Zahlen.....	3
Highlights	4
Inhaltsverzeichnis	16
Überblick über den EnCN.....	18
Projektbericht DACH	28
Projektbericht MATSOL	34
Projektbericht SOLARFABRIK	50
Projektbericht TRANSPORT	66
Projektbericht NET	77
Projektbericht PROCESS	130
Projektbericht BUILDING I	136
Projektbericht BUILDING II	148
Projektbericht SIMULATION	170
Projektbericht DESIGN	190
Projektbericht ECONOMY	194
Projektbericht ACCEPTANCE	204
Projektbericht Professur Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien	208
Projektbericht Professur Energieeffiziente Produktionstechnologien	212
Vorträge und Poster	215
Gefördert und unterstützt	232



Überblick über den EnCN

Am 11.02.2011 wurde mit der Unterzeichnung der Präambel des Energie Campus Nürnberg (EnCN) durch die Gründungspartner Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (THN), Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementtechnologie (IISB) und Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE) der formelle Grundstein für die Gründung des EnCN gelegt. Am 10. Mai 2011 folgte der offizielle Startschuss für die Kooperation mit der Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarung, in der die Struktur des EnCN geregelt ist. Gleichzeitig wurden die ersten EnCN Förderbescheide durch Ministerpräsident Horst Seehofer, Staatsminister Martin Zeil und Staatsminister Dr. Wolfgang Heubisch übergeben. Im Oktober 2011 wurde das Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) dann weiterer Partner im EnCN und im März 2013 erfolgte die Eröffnung des gemeinsamen Gebäudes Auf AEG für den EnCN.

Die erste Förderphase des EnCN hat eine Dauer von 5 Jahren. Über diesen Zeitraum fördert der Freistaat Bayern die Kooperation mit einer Summe von 50 Millionen Euro. Mit diesen Mitteln wird die Infrastruktur, die Einrichtung von 9 Nachwuchsprofessuren (5x FAU, 4x THN) und die Arbeit in 12 Forschungsverbundprojekten finanziert. Als zusätzliche Finanzierungssäule werden durch die Forschungspartner in dem Zeitraum 44 Millionen Euro an Drittmitteln über Projekte mit der Industrie eingebracht.

Arbeitsgrundlage des **Energie Campus Nürnberg (EnCN)** ist die Vision einer nachhaltigen, vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiewirtschaft. Unter dieser Vision verfolgen die Kooperationspartner im EnCN gemeinsam das Ziel, die Effizienz in der gesamten Energiekette, von der Erzeugung¹ über Transport und Speicherung bis zur Nutzung, zu steigern. Dieser ganzheitliche Ansatz, Energieforschung entlang der gesamten Energiekette, in einer verbindlichen und nachhaltigen Forschungskooperation vollständig zu betrachten, wurde in dieser Form bisher noch nicht realisiert. Ebenso einzigartig ist die Kooperation von Universität, Technischer Hochschule, Fraunhofer-Gesellschaft und einer außeruniversitären Forschungseinrichtung an einem Standort (Campus-Struktur) – dem interdisziplinären und institutionsübergreifenden Energieforschungszentrum „**Energie Campus Nürnberg**“. Als sichtbares Zentrum für Energieforschung in der Region wird mit dem Energie Campus Nürnberg auch eine Marke für Energieforschung entwickelt, die internationale Sichtbarkeit bekommen soll.

Vision

Die gemeinsame Vision des Energie Campus Nürnberg wurde in Teilen bereits in der Präambel des EnCN verdeutlicht und später im Rahmen der Strategieprozesse präzisiert. Die Vision wird von allen Partnerorganisationen und den Mitgliedern der wissenschaftlichen Leitung gemeinsam getragen:

Der Energie Campus Nürnberg ist eine interdisziplinäre Plattform für Energieforschung in Bayern mit dem Ziel, die notwendigen Technologien für eine *sichere, kostengünstige, klimaschonende, akzeptierte und nachhaltige* Energieversorgung, basierend auf regenerativen Energiequellen, zu schaffen. Insbesondere umfasst dies die Kombination von Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen und Energietransport mit intelligenter Einspeisung und Speicherung, in Verbindung mit einer effizienten Verwendung und Verwertung. Begleitet werden diese Entwicklungen durch systemtechnische mathematische Betrachtungen, Akzeptanzforschung, Simulation und Design.

In 2015 wurde diese Vision noch einmal bestätigt. Für die Zukunft soll jedoch eine Erweiterung stattfinden, um zu verdeutlichen, dass der EnCN mit seiner Forschung auch den Prozess des Strukturwandels in unserem Energiesystem behandelt.

Mit seiner Forschung will der Energie Campus Nürnberg den energetischen Strukturwandel begleiten und Wege für die Transformation unseres Energiesystems zu einer regenerativen Energieversorgung aufzeigen.

Unser Selbstverständnis

Die Wissenschaftler des EnCN betreiben internationale Spitzenforschung auf dem Energiesektor. Von unterschiedlichen Institutionen kommend, arbeiten die Forscher in einem einzigartigen interdisziplinären Kooperationsverbund zusammen. Sie teilen

¹ Im gesamten Dokument verwenden wir bewusst zur besseren Verständlichkeit die thermodynamisch zwar unkorrekten, aber im allgemeinen Gebrauch üblichen Begriffe der Energieerzeugung und –nutzung.

die Vision der regenerativen Energieversorgung mit dem Ziel, den energetischen Strukturwandel zu begleiten und die Transformation zu einem regenerativ gespeisten Energiesystem zu ermöglichen.

Wir sind überzeugt, dass die Realisierung dieser Vision aus einer ganzheitlichen Betrachtung des Energiesystems entstehen muss. Als „Energie Think-Tank“ hat der EnCN eine einzigartige und geeignete Struktur, um sich einer solchen Problemstellung anzunehmen.

Ziele

Die Gründungspartner des EnCN verfolgen die gemeinsamen Ziele:

1. Wege für die Transformation unseres Energiesystems zu einer regenerativen Energieversorgung aufzeigen
2. Die dafür notwendigen Technologien entwickeln und in die Anwendung bringen
3. Die Umsetzung der Energiewende unterstützen
4. Ein dauerhaftes Energieforschungszentrum schaffen
5. Die (regionale) Wirtschaft stärken

Dafür nutzen Sie ihre gemeinsamen Kompetenzen in den ingenieur- und naturwissenschaftlichen Themenfeldern der:

- Materialforschung und Prozessentwicklung für die solare Energiewandlung, die chemische Speicherung von Energie und den stofflichen Energietransport,
- Leistungselektronik, Informationstechnik und Energieflusssteuerung für elektrische Netze (Smart Grids),
- Steigerung der Energieeffizienz durch neue Materialien, Prozesse, Elektronik und Gebäudetechnik.

Organisation

Die Organisation des Energie Campus Nürnberg besteht im Wesentlichen aus zwei Strukturen. Eine übergeordnete Leitungsstruktur, bestehend aus der „Wissenschaftlichen Leitung“ des EnCN und der Geschäftsstelle des EnCN (dem „Dach“), sowie einer Projektstruktur, die sich aus insgesamt 11 Förderprojekten bildet.

Die Wissenschaftliche Leitung

Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN ist verantwortlich für die Steuerung der EnCN-Aktivitäten. Für jedes der 11 Projekte wird durch den für das Projekt jeweils federführenden Partner, aus den Reihen der am Projekt beteiligten Wissenschaftler, ein Projektsprecher bestellt. Die Ausnahmen bilden BUILDING I und II, welche gemeinsam einen Projektsprecher bestellen und das DACH, welches keinen Projektsprecher benötigt. Die Kooperationspartner wählen den Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung des EnCN einvernehmlich aus den Reihen der am EnCN beteiligten Wissenschaftler der FAU. Der Vorsitzende und die 9 Projektsprecher bilden die Wissenschaftliche Leitung. Die Wissenschaftliche Leitung tagt einmal monatlich. Innerhalb der Wissenschaftlichen Leitung findet der Informationsaustausch über laufende Aktivitäten und Arbeitsstände in den Projekten statt. Die Wissenschaftliche Leitung berät und initiiert projektübergreifende Marketingmaßnahmen, Öffentlichkeitsarbeit sowie gemeinsame Projekte und Aktivitäten. Die Wissenschaftliche Leitung besteht aus:

Vorsitzender der Wissenschaftlichen Leitung:

Prof. Dr. Wolfgang Arlt (FAU)

Stellv. Sprecher:

Prof. Dr. Christoph Brabec (FAU)
Prof. Dr. Armin Dietz (TH Nürnberg)
Hr. Karlheinz Ronge (Fraunhofer IIS)

Projektsprecher:

Prof. Dr. Christoph Brabec (SOLARFABRIK DER ZUKUNFT; MATSOL, FAU)
Prof. Dr. Peter Wasserscheid (TRANSPORT; FAU)
Hr. Karlheinz Ronge (NET; Fraunhofer IIS)
Prof. Dr. Armin Dietz (PROCESS; TH Nürnberg)
Prof. Dr. Wolfgang Krömer (BUILDING; TH Nürnberg)
Prof. Dr. Reinhard German, Prof. Dr. Alexander Martin (SIMULATION; FAU)
Prof. Walter Mehl (DESIGN; TH Nürnberg)
Prof. Dr. Veronika Grimm (ECONOMY; FAU)
Prof. Dr. Christina Holtz-Bacha (ACCEPTANCE; FAU)



Abbildung 1: Die Wissenschaftliche Leitung des EnCN

Das Dach

Zur Koordination ihrer Aktivitäten und zur Unterstützung des Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und der Wissenschaftlichen Leitung selbst, hat der EnCN eine Geschäftsstelle eingerichtet, welche ebenfalls aus EnCN-Fördermitteln finanziert wird. Diese Geschäftsstelle bildet das „DACH“ des EnCN. Das DACH ist Ansprechpartner für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, unterstützt den Sprecher bei der Repräsentation nach außen, und betreut die Räumlichkeiten und Infrastruktur. Das DACH bündelt auch die Zusammenarbeit mit dem Förderverein und arbeitet zu diesem Zweck eng mit dessen Geschäftsstelle zusammen. Personal und Ressourcen der rechtlich unselbstständigen Geschäftsstelle des EnCN sind bis Ende 2015 bei der FAU, ab 2016 beim ZAE Bayern in Form einer Geschäftsbesorgung angesiedelt. Inhaltlich ist die Geschäftsstelle des EnCN der Wissenschaftlichen Leitung zugeordnet und vollzieht deren Beschlüsse. Die Geschäftsstelle besteht aus:

Geschäftsführer: Dr. Alexander Buchele

Assistenz: Ioanna Dimopoulou

Projektmanagement: Kristin Zeug

Gebäudemanagement: Rudolf Heindel



Abbildung 2: Die EnCN-Geschäftsstelle

Projektstruktur

Neben der Leitungsstruktur hat der EnCN noch eine Projektstruktur. Inhaltlich orientieren sich die Projekte des EnCN entlang der Energiekette von der Erzeugung, über Transport und Speicherung bis hin zur effizienten Nutzung von Energie. Die Projekte sind Verbundprojekte der institutionellen Partner und werden auf dem Campus des EnCN zusammengeführt. Von den 11 Projekten entstammen 6 den klassischen Natur- und Ingenieurwissenschaften und gliedern sich entlang der Energiekette.

Begleitend werden, im Rahmen von 4 weiteren Projekten, Querschnittsthemen untersucht die den Menschen als Person oder die Gesellschaft in das Thema Energie einbinden. Ein Überblick in die Struktur ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Dach als koordinierende Stelle ist das zwölfte Projekt.

Die Projekte in sich sind noch einmal in Unterprojekte eingeteilt, denen jeweils ein Projektleiter und Projektmitarbeiter zugeteilt sind. Die Projektgruppen sind teilweise institutionsübergreifend. Die Arbeit der Wissenschaftler erfolgt im engen räumlichen Verbund, vorwiegend in den Räumlichkeiten des EnCN. Teilweise werden Arbeiten jedoch nach wie vor an anderen Orten durchgeführt, weil die Infrastrukturausstattung im EnCN nicht für alle Aktivitäten ausreichend ist. Insgesamt besteht der EnCN aus 46 solcher Unterprojekte.

Die Projektsprecher vertreten die Projekte nach außen und in der Wissenschaftlichen Leitung. Die wissenschaftliche Arbeit wird jeweils in den Unterprojekten durch die jeweiligen Unterprojektleiter koordiniert

ENERGIEKETTE

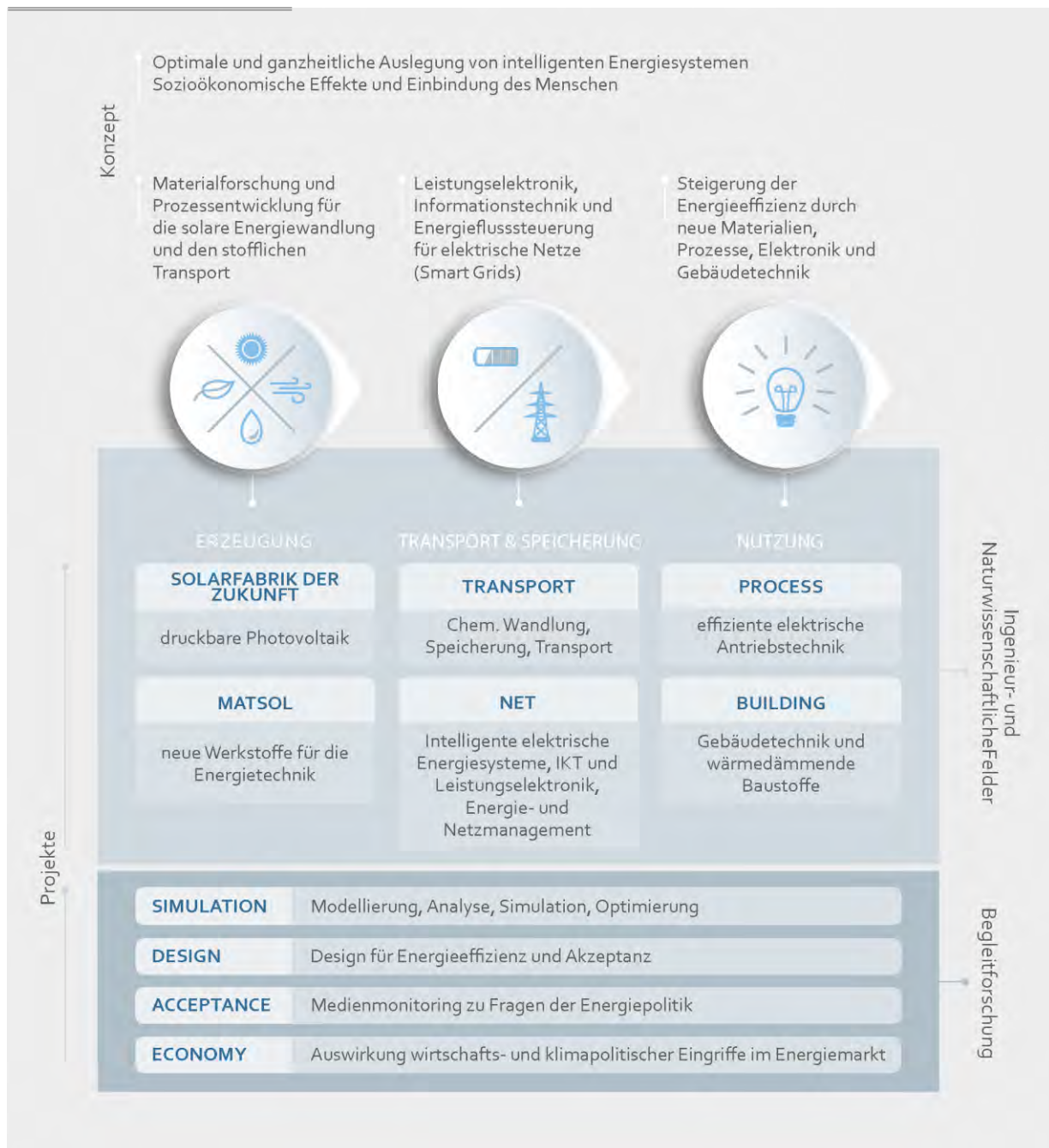


Abbildung 3: Überblick über die konzeptionelle Struktur des EnCN im oberen Teil, zusammen mit den konkreten Forschungsprojekten des EnCN im unteren Teil.

Die Kooperationspartner

Der EnCN ist eine Initiative der Gründungspartner Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. und dem Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., die sich in 2011 in einem Kooperationsvertrag zur Gründung des Energie Campus Nürnberg bekannt haben:



Abbildung 4: Überblick der Forschungsinstitutionen im EnCN

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 10 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.

Darüber hinaus erfolgte im Februar 2014 eine Zwischenevaluierung in Form einer fachlichen Begutachtung aller Einzelprojekte durch externe Gutachter, welche von den Ministerien beauftragt wurden.

Das finanzielle Reporting unterliegt der bayerischen Haushaltsordnung und erfolgt durch die einzelnen Partnerinstitutionen direkt an die zuständigen Ministerien.

Der Abschlussbericht ist eine Zusammenfassung der ersten Förderperiode des EnCN und besteht aus den Berichten der Einzelprojekte. Er ist ein internes Dokument, um die Fördermittelgeber über den Fortschritt der Arbeiten und die Entwicklung des Energie Campus Nürnberg zu informieren. Es ist der sechste Bericht seit Gründung des EnCN im Jahr 2011. Die Jahresberichte können auf Anfrage über die Geschäftsstelle des EnCN bezogen werden.

Kernkompetenzen

Durch seine Heterogenität und breite Aufstellung hat der EnCN eine Vielfalt fachlicher Kompetenzen. Diese werden durch die einzelnen Forschungsgruppen aufgebaut und ständig erweitert. Übergeordnet zu diesen fachlichen Kompetenzen haben sich ineinandergreifende und übergeordnete Kernkompetenzen ausgebildet, die sich gegenseitig ergänzen. Diese sind:

- **Systemdiagnose** – die Bewertung von Systemen und Identifizierung von Verbesserungspotenzialen
- **Simulation und Optimierung** – die Abbildung von vernetzten und physikalischen Systemen durch Simulation und das Finden von optimalen Lösungen in komplexen Systemen
- **Technologieentwicklung** – Die Entwicklung von technischen Lösungen von der Grundlagenforschung bis hin zur Produktentwicklung
- **Implementierung** – Den Einsatz von neuen Technologien unter realistischen Betriebsbedingungen

Die Stärke des EnCN ist, dass er all diese Kernkompetenzen unter einem Dach vereint und „aus einer Hand“ anbieten kann. Dadurch wird die Kooperation für die Unternehmen deutlich erleichtert. Bei Bedarf werden dann zu den Kernkompetenzen die notwendigen fachlichen Kompetenzen eingebunden.

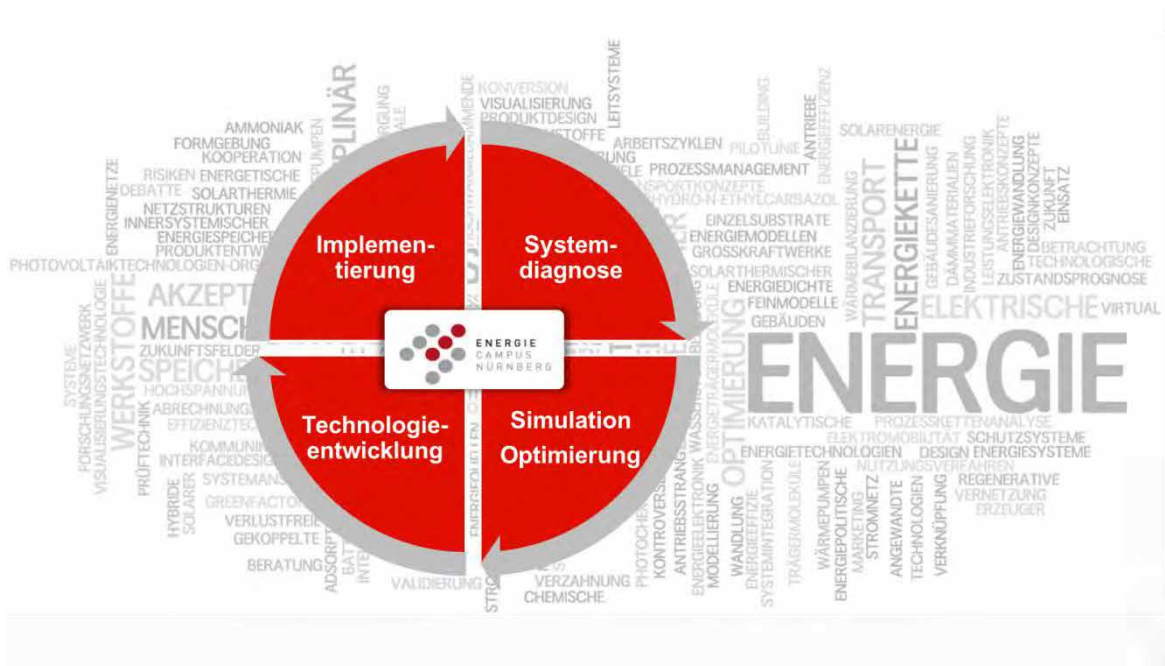


Abbildung 5: Die Kernkompetenzen des EnCN greifen ineinander, vor dem Hintergrund einer Vielfalt von Fachkompetenzen.

Alleinstellungsmerkmale

Der EnCN hat eine Reihe von Alleinstellungsmerkmalen, die ihn gegenüber anderen Forschungsinstitutionen auszeichnen und bemerkenswert machen:

Ganzheitliche Betrachtung – der EnCN ist nicht nur stark in einem Themenbereich, sondern bietet eine ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems, indem er viele Themenbereiche miteinander vernetzt, um bessere und systemverträgliche Technologielösungen zu schaffen.

Interdisziplinarität – durch unterschiedliche Forschungsansätze können Themen in einer ungewohnten Breite behandelt werden. Kompetenzen werden nach Bedarf in eine Problemstellung eingebracht.

Institutionsübergreifend – durch die Kooperation der unterschiedlichen Forschungsinstitutionen Universität, Hochschule, Fraunhofer und ZAE können die jeweiligen Stärken der Institutionen optimal für eine Problemlösung eingebracht werden.

Netzwerk – Der EnCN ist zentraler Knotenpunkt in der Region für das Thema Energieforschung. Über einen gut sichtbaren und erreichbaren Ansprechpartner wird ein leichter Zugang zu einem großen Netzwerk von Energieforschung ermöglicht.

Unabhängigkeit – als unabhängige und kompetente Institution hat der EnCN die Glaubhaftigkeit objektiv zu beurteilen und frei von Interessen zu handeln. Er kann als neutrale Plattform für gemeinsame Forschung unterschiedlicher Partner dienen.

Flexibilität – Durch die Förderstruktur hat der EnCN Freiheiten, seine Forschung spezifisch auszurichten und auf die Bedürfnisse von industriellen Partnern einzugehen.

Die Alleinstellungsmerkmale erlauben es dem EnCN, ein sehr breites Angebot zu entfalten. Er kann die komplette Wertschöpfungskette von der strategischen Grundlagenforschung bis hin zur angewandten Entwicklung eines fertigen Produktes anbieten.

Mehrwert der Kooperation

Durch die Kooperation im EnCN ist Mehrwert sowohl extern für Unternehmen, als auch intern für die beteiligten Wissenschaftler entstanden.

Intern ist der Mehrwert der Kooperation:

1. eine deutlich verbesserte Sichtbarkeit nach außen, durch eine mittlerweile bekannte und anerkannte Marke,
2. die Möglichkeit mit einem breiteren Angebot an Unternehmen heranzutreten, indem durch die enge Kooperation Kompetenzen eingebunden werden, die vorher nicht zugänglich waren,
3. die gebündelte Darstellung der Angebote der Partnerinstitutionen auf einer gemeinsamen Plattform erhöht die Zusammenarbeit mit Industriepartnern,
4. verbesserte Kommunikation und Koordination ermöglichen eine breitere Wissensbasis, verringern Dopplungen und vermeiden „Reibungsverluste“.

Aus externer Sicht ist der Mehrwert der Kooperation:

1. ein leichter Zugang zu den Forschungskompetenzen der beteiligten Partner,
2. die Möglichkeit, sich durch Vernetzung der beteiligten Institutionen, „das Beste“ nutzbar zu machen,
3. die Verbindung zu einer starken, neutralen Marke für die Energieforschung,
4. die Möglichkeit, ein breites Forschungsangebot „aus einer Hand“ zu nutzen,
5. Forschungsfördergelder für sich zu nutzen, ohne langwierige Anträge stellen zu müssen.

Kooperation mit dem EnCN

Der EnCN ist eine Marke und hat keine eigene Rechtsform. Daher ist eine direkte Kooperation juristisch nicht möglich. Um mit dem EnCN zusammen zu arbeiten, muss daher eine vertragliche Kooperation mit einer oder mehreren der Gründungsinstitutionen erfolgen. Der EnCN wirkt dabei lediglich als Mittler. Die Kooperation „mit dem EnCN“ erfolgt in der Regel in vier Schritten, die auch in Abbildung 6 abgebildet sind:

1. Kontaktaufnahme: Ansprache des EnCN durch Unternehmen über die Geschäftsstelle, Mitglieder der Wissenschaftlichen Leitung oder Projektleiter. Beschreibung der generellen Problemstellung und des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs,
2. Kooperationsgespräch: Passend zum F&E Bedarf werden die notwendigen Kompetenzen aus dem EnCN zusammengestellt. In einem Gespräch mit den Gruppenleitern werden gemeinsam mit dem Unternehmen eine Projektdefinition und Arbeitspakete ausgearbeitet,
3. Angebot: Eine Partnerinstitution übernimmt die Konsortialführung. Es wird ein gemeinsames Angebot aller beteiligten Gruppen mit Kosten- und Zeitplan erstellt,

4. Projektphase: Im Forschungsprojekt erfolgen die Koordination der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im EnCN und die Abstimmung mit dem Auftragsunternehmen durch den Konsortialführer aus dem EnCN, gleichwohl wie die Übermittlung der Ergebnisse und die finanzielle Abwicklung.

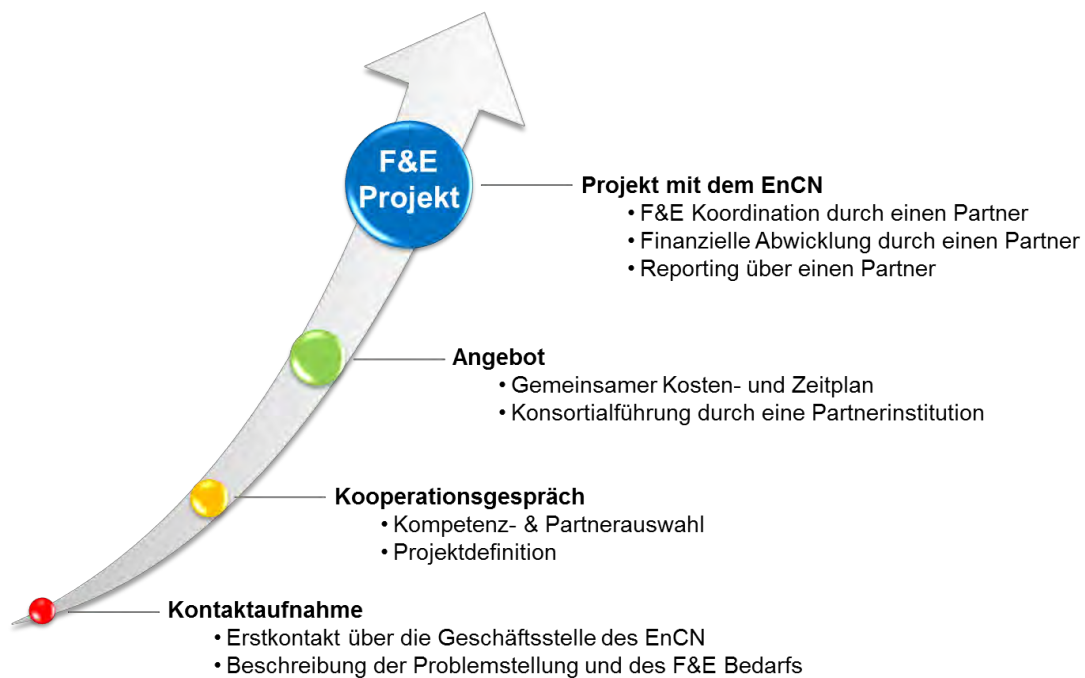


Abbildung 6: Prozess der Kooperationsanbahnung mit dem EnCN.

Der Standort

Für den EnCN wurde von den Kooperationspartnern im Frühjahr 2012 eine Immobilie im Nürnberger Westen „Auf AEG“ gemietet. Das Gelände befindet sich zwischen den Zentren von Nürnberg und Fürth, 2km von der Nürnberger Innenstadt entfernt und ist mit öffentlichen Verkehrsmitteln über den U-Bahn Anschluss sowohl vom Nürnberger, als auch vom Fürther Hauptbahnhof in wenigen Minuten erreichbar. Mit der A73 besteht ein unmittelbarer Autobahnanschluss, über den Erlangen in ca. 15min erreicht werden kann. Der Nürnberger Flughafen kann in ca. 15 min angefahren werden (Abbildung 7).



Abbildung 7: 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 neuen Campus Auf AEG sind auch der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, das E|Drive Center und das E|Home Center der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg sowie der Nuremberg Campus of Technology 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. In den nächsten Jahren ist zu erwarten, dass diese Fläche signifikant ansteigen wird, da größere Teile der Technischen Fakultät der FAU auf ca. 100.000 qm und Teile der TH-Nürnberg auf 25.000 qm des Geländes angesiedelt werden sollen.



Abbildung 8: 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 Deutschland gibt es 11 solcher Metropolregionen. Die Metropolregionen sind die sozialen und wirtschaftlichen Treiber eines Landes. In der EMN wohnen 3,5 Millionen Menschen, was 27% der Bevölkerung des Freistaats Bayern entspricht, auf einer Fläche von 21.800km² (~31 % der Fläche von Bayern). Sie erwirtschaften ein Bruttoinlandsprodukt von 118 Mrd € (~21% von Bayern).

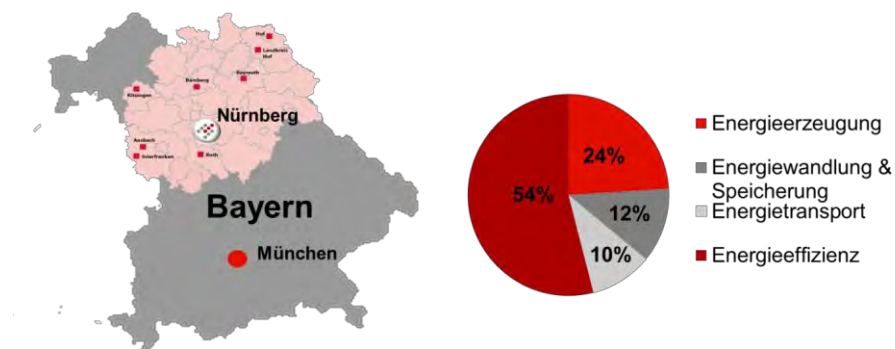


Abbildung 9: Links – die Metropolregion Nürnberg. Rechts – die Gliederung des Energiesektors der EMN.

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

- Verkehr und Logistik
- Automotive
- Information und Kommunikation
- Medizin und Gesundheit
- **Energie** und Umwelt
- Neue Materialien
- Automation und Produktionstechnik

Der Energiesektor ist einer der wichtigsten Wirtschaftsfaktoren der EMN. In diesem Sektor arbeiten über 111.000 Beschäftigte in über 14.000 Unternehmen und erwirtschaften einen jährlichen Umsatz von über 27 Milliarden Euro (~20% des produzierenden Gewerbes). Davon entfallen 54% auf den Sektor Energieeffizienz, 24% auf die Energieerzeugung, 12% auf Energiewandlung und Speicherung sowie 10% auf den Energietransport (Abbildung 9).

Die Förderung

Der EnCN ist eine Maßnahme der Bayerischen Staatsregierung im Zusammenhang mit dem „Strukturprogramm Nürnberg/Fürth“, welche im Rahmen der Initiative „Aufbruch Bayern“ stattfindet. Das Strukturprogramm hat ein Haushaltsvolumen von 115 Millionen Euro über fünf Jahre, von denen 50 Millionen Euro auf den EnCN entfallen.

DACH

Projektbericht EnCN1

Das EnCN-DACH hat die Funktion der Vernetzung des Energie Campus Nürnberg, sowohl im Innenverhältnis, zwischen den Kooperationspartnern, als auch im Außenverhältnis zur Wirtschaft, den Kommunen und der Politik. Das EnCN-DACH ist der erste Ansprechpartner für externe Anfragen und somit auch ein Aushängeschild des EnCN. Es bildet die Geschäftsstelle und ist für die wissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit zuständig. Im Auftrag der Wissenschaftlichen Leitung nimmt die Geschäftsstelle die Präsentation der wissenschaftlichen Aktivitäten und Ergebnisse der EnCN-Forschung im In- und Ausland wahr. Der Geschäftsführer des EnCN initiiert Forschungsprojekte und Kooperationen mit externen Firmen. Er hat einen Gesamtüberblick über die Aktivitäten aller Partner im EnCN und leitet externe Anfragen gezielt weiter. Das EnCN-DACH kooperiert eng mit dem Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und repräsentiert alle Kooperationspartner des EnCN gleichwertig und institutionsneutral.

1 Aktivitäten

1.1 Organisation

Das „DACH“ des EnCN besteht derzeit aus 4 festen Mitarbeitern: dem Geschäftsführer Dr. Alexander Buchele, der Assistentin Ioanna Dimopoulou, dem Gebäudemanager Rudolf Heindel und der Projektmanagerin Kristin Zeug. Zusätzlich unterstützen Thomas Eisele und Simon Gubo als studentische Mitarbeiter die Arbeit der Geschäftsstelle. Der langjährige Geschäftsführer Dr. Jens Hauch hat die Geschäftsstelle zum 01.01.16 verlassen und ist nun am ZAE Bayern als Bereichsleiter für Erneuerbare Energien tätig. Die Geschäftsstelle kümmert sich um gemeinsame Aktivitäten des EnCN und übernimmt die Organisation von EnCN Veranstaltungen. Darüber hinaus koordiniert das DACH die Öffentlichkeitsarbeit des EnCN.

Zum 01.01.2016 ist die Geschäftsstelle von der FAU ans ZAE überführt worden. Diese Überführung hat vor allem den Grund, dass in dieser Konstellation eine Entfristung der Mitarbeiter der Geschäftsstelle möglich werden soll. Der organisatorische Übergang hat ohne Probleme geklappt, die Geschäftsstelle war jederzeit voll einsatzfähig.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

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

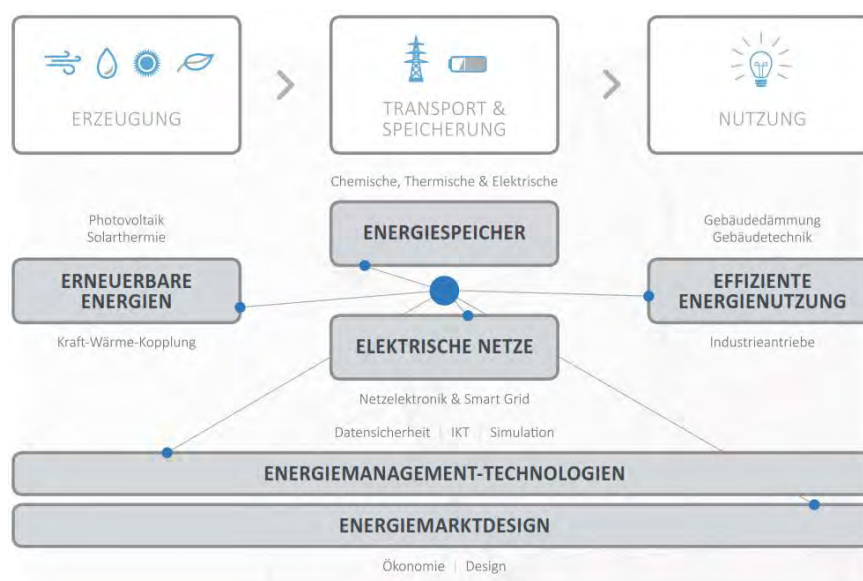


Abbildung 10: Themenstruktur des EnCN in der 2. Förderphase

Ein wesentlicher Teil der Arbeit der Geschäftsstelle im vergangenen Jahr war und ist die organisatorische Vorbereitung der 2. Förderphase (EnCN²), die ab 01.01.2017 startet und bis 31.12.2021 laufen wird. Die im Jahr 2015 gestellten Anträge werden bewilligt, wie eingereicht. Durch die veränderten Ziele und Schwerpunkte im EnCN² fallen einige Partner aus der Förderung durch den Freistaat, andere kommen hinzu oder werden gestärkt. Unverändert bleibt jedoch der Fokus auf der gesamten Wertschöpfungskette der Energie, einem der zentralen Ausgangspunkte des EnCN. Die angepasste Themenstruktur für die 2. Förderphase ist in Abbildung 10 dargestellt. Dies macht auch eine Anpassung der Flächenverteilung im EnCN notwendig. Dieser Prozess wurde von der Geschäftsstelle moderiert und konnte mit einem einvernehmlichen Ergebnis aller Projektbeteiligten und Institutionen abgeschlossen werden. Damit ist eine wesentliche Grundvoraussetzung für die nahtlose Weiterarbeit im EnCN² geschaffen worden. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung liegen auch die Förderbescheide des StMWi bereits vor. Die Bescheide durch das StMBW stehen aufgrund der sehr späten Verabschiedung des Doppelhaushaltes noch aus.

Der Fachbeirat bestätigte auf seiner Sitzung am 18.03.16 erneut die positive Entwicklung des EnCN und bezeichnet „das Erreichte [als] lobenswert“. Wie im Vorjahr merkt der Fachbeirat an, dass eine stärkere Führungsstruktur, z.B. in Form einer Governance wünschenswert wäre. Die Umsetzung dessen ist weiterhin eine große Herausforderung, die im Hinblick auf die z.T. ohne Förderung am EnCN² verbliebenen Partnerinstitutionen IIS und IISB keine leichten Randbedingungen hat.

Der Ankauf des AEG-Areals ist weiterhin nicht entschieden. Durch die Optionsziehung der Partner im Mietvertrag besteht nun jedoch ein Mietverhältnis bis zum 28.02.2025, das dem EnCN mittelfristige Planungssicherheit gibt. Aufgrund der laufenden Verhandlungen sind jedoch Flächenerweiterungen derzeit nicht möglich.

Die Verstetigung der Geschäftsstelle ist weiterhin eine Aufgabe, die Mitarbeiter sind weiterhin befristet angestellt und auch der Förderbescheid zur 2. Förderphase sieht keine Entfristung vor. Auf der 24. Lenkungsausschusssitzung am 29.09.16 bekräftigten sowohl StMWi als auch ZAE, dass sie intensiv an der Entfristung arbeiten.

1.2 Markenstrategie

Bereits kurz nach dem Start des EnCN wurde 2012 ein Marken- und Strategieprozess durch die Geschäftsstelle initiiert. Diese wurde 2015 komplett überarbeitet und daraus ein Markensteuerrad und eine Markenstory entwickelt. Dieser Prozess wurde 2016 fortgesetzt. Dabei wurden zunächst die bestehenden Instrumente der Öffentlichkeitsarbeit analysiert und daraus Maßnahmen und Empfehlungen entwickelt, die das Markenbild des EnCN weiter schärfen sollen.

In seinem Kern steht der EnCN für das Thema Technologietransfer. Er bietet verwertbare F&E Ergebnisse, Zugang zu einer breit aufgestellten interdisziplinären Spitzenforschung und passgenaue Produkte und Dienstleistungen die aus dem Systemgedanken entstehen für Unternehmen. Dabei tritt der EnCN kompetent, professionell, innovativ & visionär auf und bleibt stets lösungsorientiert und nahbar.

Es wurde dabei entschieden, sich auf einige Instrumente und Veranstaltungsarten zu konzentrieren, insbesondere ein gut gepflegter und aktueller Internetauftritt, eine aktuelle „Corporate“-Präsentation und geeignete Printmedien in Form der Highlightbroschüre und einseitiger A4-Flyer.

Die zugehörige Bildsprache soll einen Wiedererkennungswert haben, darf gerne surreal wirken, soll aber die gemeinsame Forschungsimmoblie und die Protagonisten aus den Projekten in Szene setzen.

1.3 Öffentlichkeitsarbeit



Abbildung 11: EnCN-Corporate Präsentation mit neuem Design und aktualisiertem Inhalt

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Markenworkshop wurde das Corporate Design des EnCN weiter vorangetrieben und bestehende Instrumente weiterentwickelt. So wurde unter anderem die Corporate-Präsentation des EnCN neu gestaltet und inhaltlich angepasst (Abbildung 11).

Die Highlights-Broschüre wurde ebenfalls komplett überarbeitet und an das neue Corporate Design angepasst (Abbildung 12).

Sowohl für Präsentation als auch für die Highlights-Broschüre wurden neue Bilderserien entwickelt. Diese zeigen die gemeinsame Forschungsimmobilie, am EnCN entwickelte Produkte und Technologien und Forscher, die alle dem Betrachter zugewandt sind. Auch die Sichtbarkeit des Gebäudes wurde erhöht, durch die Installation von 3 Fahnen und einer Stele an der Gebäudefront zur Fürther Straße hin.

Organisiert von der Geschäftsstelle nimmt der EnCN an regelmäßigen Veranstaltungen teil. Die Präsentation auf den Veranstaltungen hat das Ziel, die aktuellen Projekte und Entwicklungen des EnCN nach außen hin sichtbar zu machen und dabei auch die Themenvielfalt am EnCN zu betonen. Regelmäßige Veranstaltungen sind:

- Hannover Messe
- iSEneC
- Offen Auf AEG
- Lange Nacht der Wissenschaften



Abbildung 12: Umschlag der neuen Highlights-Broschüre im neuen EnCN Corporate Design

Als weiteres Instrument der Öffentlichkeitsarbeit wurden zunächst 4 Kurzvideos konzipiert und gedreht. Fokus der Videos liegt darauf, die Fähigkeiten des EnCN möglichst kompakt darzustellen und dabei konkrete Entwicklungen und Ergebnisse sowie deren Anwendungsmöglichkeiten zu zeigen. Die Videos dienen als Information für Wirtschaft und Öffentlichkeit und werden auf Veranstaltungen und Messen gezeigt, sowie auf dem EnCN-Internetauftritt. Die Themen der 4 Videos sind:

- Energieeffiziente Antriebe
- Energiemarktdesign
- Solarfabrik der Zukunft
- Wasserstoffspeicher

1.4 Veranstaltungen

Im vergangenen Jahr waren die Highlights für den EnCN die Jubiläumsfeier zum 5-jährigen Bestehen sowie die Mitausrichtung der internationalen Konferenz iSEneC.



Abbildung 13: Bilder der Jubiläumsveranstaltung; Gruppenbild von der Pressekonferenz (links) und Podiumsdiskussion beim Festakt (rechts)

Die Jubiläumsfeier wurde zusammen mit der ENERGIEregion und dem Energie-Technologischen Zentrum (jeweils 15-jähriges Bestehen) gefeiert. An der gemeinsamen Pressekonferenz nahmen neben den Jubilaren Finanzminister Dr. Söder für den Freistaat Bayern und Wirtschaftsreferent Dr. Fraas für die Stadt Nürnberg teil. Danach wurde mit einem launigen Festakt und anschließend gemütlichen Beisammensein in Halle 18 „Auf AEG“ in einer angenehmen Atmosphäre mit insgesamt knapp 200 geladenen Gästen gefeiert.



Abbildung 14: Der Auftakt der internationalen Konferenz iSEneC am 16.-17.7.16 mit begleitender Foyer Ausstellung

Um die Bekanntheit des EnCN zu steigern und ein Forum zur Veröffentlichung der Ergebnisse des EnCN zu schaffen wurde gemeinsam mit der NürnbergMesse und Bayern Innovativ ein Konzept für eine wissenschaftliche Konferenz mit internationalem Anspruch entwickelt. Unter dem Namen iSEneC – integration of sustainable Energies Conference wurde diese Veranstaltung 2016 zum ersten Mal durchgeführt und von mehr als 400 Besuchern besucht.

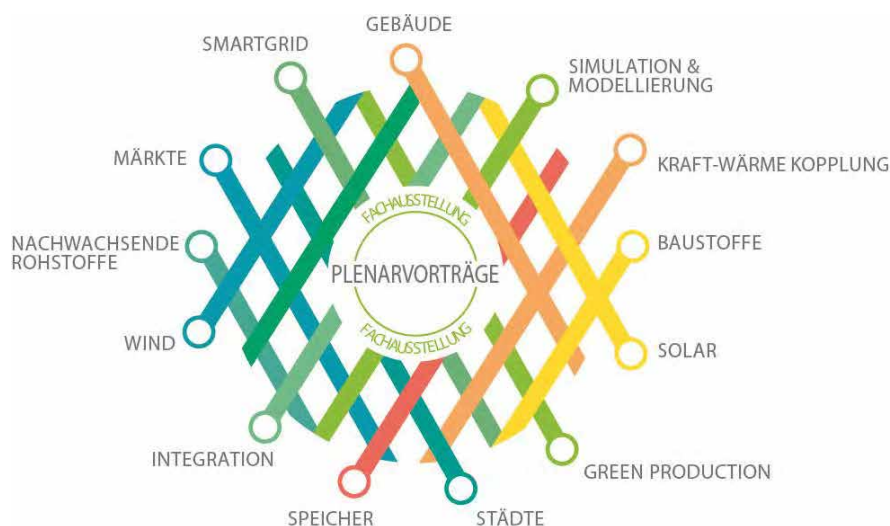


Abbildung 15: Übersicht über die Themenbereiche der iSEneC Konferenz

Die iSEneC integriert Fachkongresse zu 13 Themenbereichen, die einen wichtigen Beitrag zur erneuerbaren Energieversorgung darstellen. Die Themen ergänzen sich zu einem Energiesystem und werden durch eine gemeinsame Fachausstellung sowie Plenarvorträgen und Postern mit-einander verbunden. Jeder Themenbereich wird durch Experten aus der Wissenschaft und der Wirtschaft betreut und sollte sowohl den Stand der Technik in der Umsetzung, als auch den Stand der Wissenschaft abbilden. Der zentrale Gedanke ist die Systemintegration der Technologien. Die Veranstaltung wurde von allen Seiten als sehr erfolgreich bewertet und wird 2018 ihre Fortsetzung finden. Langfristiges Ziel ist es, die iSEneC als regelmäßige Veranstaltung zu etablieren und im 2-Jahresrhythmus zu organisieren.

Seit der Gründung haben zahlreiche wichtige Persönlichkeiten aus Politik und Wirtschaft den EnCN besucht, um sich über die einzigartige Kooperation und die Forschungsthemen zu informieren. Zu den wichtigsten Besuchern gehören:

- Peter Altmaier, damals Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Staatssekretär Florian Pronold, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- Prof. Dr. Johanna Wanka, Bundesministerin für Bildung und Forschung
- Winfried Kretschmann, Ministerpräsident Baden Württemberg
- Ilse Aigner, Bayerische Staatsministerin für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
- Staatssekretär Franz Josef Pschierer, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
- Dr. Markus Söder, Bayerischer Staatsminister der Finanzen, für Landesentwicklung und Heimat
- Prof. Dr. Claudia Kemfert, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
- Dr. Günther Beckstein, Bayerischer Ministerpräsident a.D.
- Prof. Dr. Heinrich von Pierer, ehem. Vorstandsvorsitzender Siemens AG

Ein fester Bestandteil des Veranstaltungskalenders am EnCN ist die interne Konferenz, die in diesem Jahr zu 5. Mal stattfand. Auf dieser Veranstaltung treffen sich die Mitarbeiter des EnCN und stellen sich gegenseitig die neuesten Ergebnisse aus der Forschung vor.



Abbildung 16: Impressionen der Internen Konferenzen am EnCN von 2012 - 2016

2 Schlussworte

2016 geht die erste Förderphase des EnCN zu Ende. Auf die von vielen Stellen bescheinigten hervorragenden Leistungen können wir zu Recht stolz sein. In 5 Jahren wurde in Nürnberg ein über die Region hinaus deutlich sichtbares Forschungszentrum für Energie geschaffen.

Die zweite Förderphase wirft bereit ihre Schatten voraus und stellt neue Herausforderungen an die beteiligten Partner. Es wird darum gehen, die bewährten Strukturen an den sich verändernden EnCN anzupassen, neue Impulse zu geben und gemeinsam ein Konzept für die Fortführung über den anstehenden 5-Jahreszyklus hinaus zu entwickeln.

Dieser Bericht dokumentiert nicht nur die Forschungsergebnisse diesen Jahres, sondern der gesamten ersten Förderphase. Er zeigt erneut eindrucksvoll in welcher wissenschaftlichen Tiefe und Breite im EnCN geforscht wird, und was für ein einzigartiges Forschungszentrum mit dem EnCN in Nürnberg entstanden ist.

3 Presse

Der EnCN war in der ersten Förderphase regelmäßig in der Presse vertreten. Der Schwerpunkt liegt hierbei bei den lokalen Blättern, Nürnberger Nachrichten und Nürnberger Zeitung sind mit insgesamt knapp 80% aller Artikel die wichtigsten Quellen. Aber auch in relevanten überregionalen Printmedien wie der Süddeutschen Zeitung und der Welt am Sonntag wurde über den EnCN berichtet. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Berichterstattung im Zeitraum 2011 – 2016.

Tabelle 1: Übersicht über die Berichterstattung über den EnCN in Printmedien 2011 - 2016.

Zeitung	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Summe
Bayerische Rundschau	1		1				2
Bayerische Staatszeitung	6	3	7	3	5	6	30
Berliner Zeitung						1	1
Coburger Tageblatt	1		1				2
Darmstädter Echo	1						1
Der Tagesspiegel	1						1
DIE KITZINGER	1		1		1		3
Frankenpost		2	1	1	1		5
Fränkischer Tag Bamberg	1		1	1			3
Fränkischer Tag Erlangen-Höchstadt	1		1		1	1	4
Fränkischer Tag Forchheim	2		2				4
Fränkischer Tag Hassberge	1		1				2
Fränkischer Tag Kronach	1		1		1		3
Fränkischer Tag Obermain	1		1			1	3
Main-Post					2		2
Mittelbayerische Zeitung					8	3	11
Neue Presse					1		1
Nürnberger Nachrichten	21	30	44	43	22	18	178
Nürnberger Zeitung	37	38	49	32	15	10	181
Passauer Neue Presse	1	2		3			6
Saale-Zeitung	1		1				2
Süddeutsche Zeitung		5			1		6
Süddeutsche Zeitung (Landkreise)	4	7	9	3			23
Welt am Sonntag			1				1
Südkurier	1						1
Sächsische Zeitung					1		1
Summe	83	87	122	86	59	40	477

SOLARFABRIK DER ZUKUNFT

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. Erneuerbare Energien</p> <p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Department Werkstoffwissenschaften (WW) Lehrstuhl für Werkstoffe der Elektronik und Elektrotechnik Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe Department Chemie und Pharmazie Lehrstuhl für Physikalische Chemie I Lehrstuhl für Organische Chemie I Lehrstuhl für Organische Chemie II Institut für Physik der Kondensierten Materie Lehrstuhl für Kristallographie und Strukturphysik Department Informatik</p>	<p>TP1: Technikum (Dr. Hans-Joachim Egelhaaf /ZAE) TP2: Mol-PPV (Dr. Monika Voigt/FAU-WW) TP3: CIS-PPV (Prof. Dr. Peter Wellmann/FAU-WW) TP4: Si-PPV (Dr. Edda Stern/ZAE) TP5: Opt-PPV (Dr. Karen Forberich/FAU-WW)</p>

Projektbericht EnCN1

Im Projekt SOLARFABRIK DER ZUKUNFT werden auf der Basis neuer Materialien und Verfahren gedruckte Solarmodule entwickelt, mit denen in einem für die Energiewende relevanten Umfang Strom für ca. 5 €Ct/kWh erzeugt werden kann. Die Erarbeitung großskalig druckbarer organischer und anorganischer Solartechnologien geschieht in enger Kooperation des ZAE Bayern mit Gruppen der Friedrich-Alexander Universität. Das ZAE Bayern übernimmt dabei die Entwicklung der Druckprozesse sowie die Charakterisierung und Integration der Module. Auf Perovskiten, anorganischen und organischen Nanopartikeln sowie kleinen organischen Molekülen basierende Solarzellen werden vom Department Werkstoffwissenschaften (WW, Werkstoffe der Elektronik und Energietechnik sowie Polymerwerkstoffe) in Zusammenarbeit mit Lehrstühlen der physikalischen und der organischen Chemie entwickelt. CIS- und CZTS-Solarzellen aus nanopartikulären Vorstufen werden am Department WW (Werkstoffe der Elektronik und Energietechnik) in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Kristallographie und Strukturphysik erarbeitet. Solarzellen aus gedruckten Siliziumschichten werden vom ZAE Bayern zusammen mit dem Department WW (Werkstoffe der Elektronik und Energietechnik) erforscht. An der Optimierung des Lichtmanagements sind die Departments Informatik und WW (Werkstoffe der Elektronik und Energietechnik) beteiligt.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Christoph Brabec
Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.



E-Mail
Christoph.Brabec@encn.de

Telefon
+49 9131 / 9398 100

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/h6r3su6>

1 Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Technikum (TP1) Dr. Hans-Joachim Egelhaaf

Die Herstellung von Solarmodulen mittels Druck- und Beschichtungsprozessen bietet eine um 2 Größenordnungen höhere Produktivität als Chip-basierte Prozesse und ermöglicht es daher, Solarmodule in einem für die Energiewende relevanten Maßstab zu niedrigsten Kosten bereitzustellen.

In der ersten Förderphase des EnCN wurde daher im Teilprojekt *Technikum* eine voll funktionsfähige Solarfabrik aufgebaut, die die apparativen und räumlichen Voraussetzungen für die Umsetzung der in den anderen Teilprojekten (*Mol-PPV*, *CIS-PPV*, *Si-PPV* und *Opt-PPV*) entwickelten PV-Technologien auf Rolle-zu-Rolle (R2R)-Fertigung großflächiger Solarmodule zur Verfügung stellt. Diese umfasst ein klimatisiertes Beschichtungslabor, das auch für die Produktion der im unverpackten Zustand feuchtigkeitsempfindlichen Perovskit-Module geeignet ist. Dieses Labor beherbergt eine Reihe von Geräten für den schrittweisen Technologietransfer vom Labor zur „roll-to-roll“ (R2R)-Fertigung, angefangen bei der Schichtapplikation auf kleiner Fläche mittels Rakel, über einen „Mini Roll Coater“, bei dem ein flexibles Substrat auf einer drehbaren Trommel aufgebracht und mittels einer Schlitzdüse beschichtet wird, bis zum „Loop-Coater“, bei dem ein 8 m langes PET Band in einer Endlosschleife durch verschiedene Druck- und

Trocknungsstationen bewegt werden kann. Durch die Modifikation der vorhandenen R2R-Beschichtungsapparaturen können außerdem die im TP5 (Opt-PPV) entwickelten dielektrische Spiegel aus beliebig vielen Schichten direkt auf Solarmodule aufgebracht werden. Mit Hilfe dieser Anlagen besteht die Möglichkeit, Parameter zur Schlitzdüsenbeschichtung, dem Tintenstrahl Druck, der thermischen und IR-Trocknung sowie der UV-Härtung von Schichten schrittweise an größere Produktionskaten anzupassen. Die gefundenen Parameter sind dann mit geringem Material- und Zeitaufwand auf die in Kooperation mit einem Druckmaschinenbauer entwickelte R2R-Beschichtungsanlage, welche 2016 in Betrieb genommen wurde, übertragbar. Die 12 Meter lange R2R-Druckmaschine (s. Abbildung 17) besteht aus drei Schlitzdüsenbeschichtungseinheiten, zwei Flexodruckstationen, IR- und Heißluft-Trockenöfen sowie einer UV-Härtungsstation zur Verkapselung der Module. Sie ermöglicht die Inline-Prozessierung und Verkapselung in einem Arbeitsgang. Damit können Solarmodule auf der Basis organischer und anderer Dünnschicht-Photovoltaiktechnologien auf einer Breite von bis zu 30 cm im Rolle-zu-Rolle-Verfahren gedruckt werden. Die Produktionskapazität der Anlage von bis zu 1 MWp/Jahr macht dabei Forschung in industrierelevanter Größenordnung möglich.

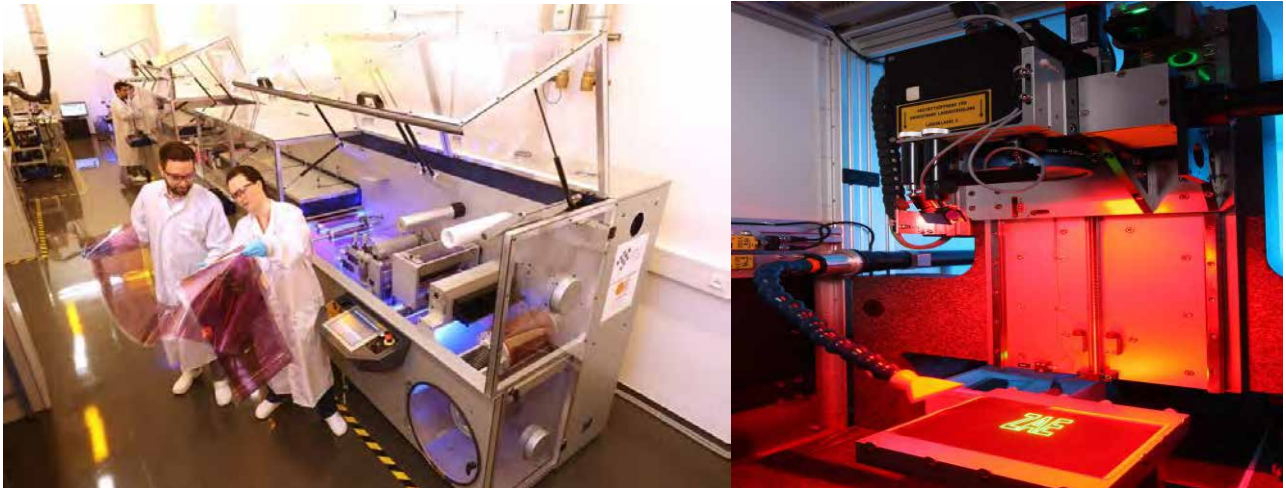


Abbildung 17: Links: R2R Beschichtungsanlage am EnCN Technikum. Die Mitarbeiter begutachten die ersten gedruckten Aktivschichten. Rechts: Femtosekundenlaser zur Strukturierung von Solarmodulen.

Die Kombination der vollflächigen Beschichtung flexibler Substrate durch R2R-Schlitzguss mit R2R-Laserstrukturierung erlaubt die monolithische Verschaltung einzelner Solarzellen zu ganzen Modulen. Der hierzu gemeinsam mit einem Laseranlagenhersteller entwickelte R2R-Femtosekunden-Laser ermöglicht dabei in einem vollautomatischen R2R-Prozess die Minimierung der Verschaltungszonen, die nicht zur Stromerzeugung beitragen und maximiert somit die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Modulfläche (s. auch Abbildung 23 in TP2).



Abbildung 18: R2R-Inkjet Anlage mit vier untereinander synchronisierten Druckstationen. Durch eine 8 kW Infrarotlampe können die Schichten nach dem Druck direkt getrocknet oder gesintert werden.

Im Bereich der gedruckten Elektronik gewinnt der Digitaldruck immer mehr an Bedeutung. Gemeinsam mit dem Druckerhersteller *Durst Phototechnik AG* wurde daher eine Tintenstrahl-Anlage entwickelt, mit der Photovoltaikmodule im R2R-Verfahren in hohem Durchsatz (bis zu 40 m/min) gedruckt werden können (s. Abbildung 18). Durch das gezielte Aufbringen einzelner Tintentropfen können mit den Tintenstrahl Druckern am EnCN Technikum beliebige Solarmodulgeometrien praktisch ohne Materialverlust realisiert werden (s. auch Abbildung 24 in TP2).

Neben den Druck- und Beschichtungsanlagen verfügt das EnCN Technikum über eine vollständige „Backend“ Ausrüstung, die die Kontaktierung, Konfektionierung, Verkapselung und Qualitätskontrolle der Module ermöglicht.

Auch in Zukunft sollen Expertise und Ausrüstung des Technikums stetig erweitert werden. Durch Projekte mit der Automobilindustrie sowie mit Fassadenherstellern ist geplant, Lösungen für die Integration gedruckter Solartechnik in den Bereichen Automotive und Gebäudeintegration zu entwickeln. Dabei spielt der Freiformdruck von Solarmodulen auf 2D sowie 3D Oberflächen eine entscheidende Rolle.

1.2 MoI PPV (TP2) Dr. Monika Voigt/Dr. Hans-Joachim Egelhaaf

Dieser Forschungsbereich setzt sich aus der Forschung verschiedener Lehrstühle der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) zusammen, der Physikalischen Chemie (*Prof. Guldi*), der Organischen Chemie (*Prof. Hirsch*, *Prof. Tykwinski*), dem Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (*Prof. Halik*), sowie darüber hinaus des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung, Abteilung Regenerative Energien (ZAE Bayern, RE, *Prof. Brabec*). Außerdem besteht eine enge Zusammenarbeit mit weiteren Lehrstühlen der FAU, dem Lehrstuhl für Kristallographie und Strukturphysik (*Prof. Hock*) und dem Lehrstuhl für Systemsimulation (*Prof. Pflaum*). Die Entwicklung neuer Syntheserouten, die Synthese kleiner organischer Moleküle und Polymere sowie deren Eignung als Solarzellenmaterial sind Schwerpunkte der Forschung an der FAU. Das ZAE Bayern fokussiert sich auf die Druckbarkeit der entwickelten Materialien, die Prozessentwicklung verschiedener Beschichtungsverfahren auf Rolle-zu-Rolle-Basis und die Steigerung der Effizienz von kostengünstigen und großflächigen Solarmodulen.

Der *Arbeitskreis Tykwinski* hat als Synthesegruppe über die gesamte Projektdauer eng mit den Gruppen des MoI-PPV-Verbandes zusammengearbeitet, um die besten synthetischen Zielstrukturen zu entwerfen und zu untersuchen. Es wurden verschiedene Serien von Molekülen hergestellt und gereinigt, die sodann untersucht wurden hinsichtlich (1) ihrer elektronischen Eigenschaften in der Gruppe von Prof. Halik (Materialwissenschaften), (2) ihrer Eigenschaften als neue Chromophore in organischen Solarzellen in den Gruppen von Prof. Brabec und Dr. Ameri (Materialwissenschaften) sowie von Prof. Guldi (Physikalische Chemie) und (3) ihrer photophysikalischen Eigenschaften in der Gruppe von Prof. Guldi.

Die ersten Arbeiten konzentrierten sich auf Acen-Derivate, einschließlich einer Serie von Derivaten, die durch die Einführung voluminöser „Schutzgruppen“ auf einer oder beiden Seiten des Acen-Kerns stabilisiert wurden (s. Abbildung 19). Diese Moleküle zeigten tatsächlich erhöhte Stabilität in Gegenwart von in der organischen Photovoltaik gebräuchlichen Fulleren-Akzeptoren. Sie waren jedoch in organischen Solarzellen leider nur von mäßigem Nutzen (*Brabec*). Die während dieser Arbeiten entwickelte synthetische Methodologie wurde für die Synthese weiterer Derivate eingesetzt, einschließlich eines ambipolaren Pentacens und eines Cyanacrylat-Derivats von Pentacen, die in organischen Solarzellen in den Gruppen von *Guldi* sowie von *Brabec* und *Ameri* untersucht wurden.

Wir wandten uns dann der Synthese neuer Silizium-Phthalocyanine (Si-PCs) zu (s. Abbildung 19), in denen die axiale und laterale Substitution variiert werden kann. Phthalocyanine sind übliche Moleküle für die Lichternte, weil sie stabil sind und intensive Absorption im sichtbaren Teil des Spektrums zeigen. Si-PCs können zur Verbesserung der Effizienz von Solarzellen eingesetzt werden, da sie sowohl als absorbierender Chromophor als auch als Additiv zur Verbesserung der Grenzflächeneigenschaften des Bauteils eingesetzt werden können. Wir konnten zeigen, dass es möglich ist, die OPV-Funktion zu optimieren, indem axiale Liganden zur Verbesserung der Absorptions- und Grenzflächeneigenschaften eingeführt werden. Unsere Arbeiten resultierten in neuen Si-PCs, deren verbesserte Eigenschaften in Solarzellen in einer Publikation dokumentiert wurden. In den beiden vergangenen Jahren haben wir die Auswirkungen einer verstärkten lateralen Substitution untersucht, wie beispielsweise in Si-NCs und Si-ACs, die die starke Q-Bandenabsorption dieser Chromophore weit in das nahe Infrarot (900 – 1000 nm) verschiebt. Nachdem Si-NCs und Si-ACs jetzt zur Verfügung stehen, werden axiale Liganden variiert, um die Eigenschaften weiter zu optimieren, wobei das bei der Synthese der Si-PCs Gelernte als Leitfaden dient.

Das Ziel des *AK Hirsch* besteht in der Entwicklung, Synthese und struktureller Charakterisierung neuer molekularer und supramolekularer Komponenten, die integrale Bausteine neuartiger Solarzellen darstellen. Die Kernkompetenz des *AK Hirsch* liegt in der Erstellung von kohlenstoffreichen Architekturen, die auf synthetischen Kohlenstoffallotropen wie Fullerenen oder Graphen basieren. Diese neuen Materialien werden hinsichtlich ihrer photovoltaischen Eigenschaften von den Kooperationspartnern im Netzwerk getestet.

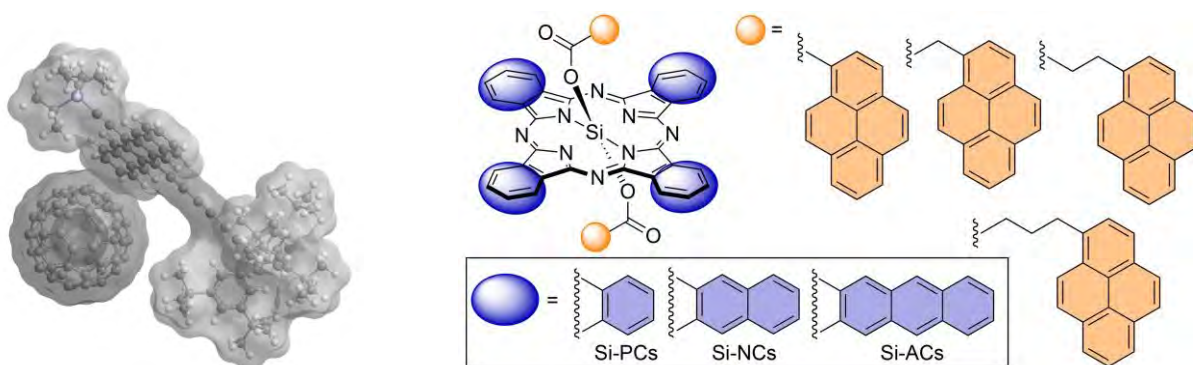


Abbildung 19: Links: sterisch abgeschirmtes Pentacen mit C₆₀. Rechts: Schematische Darstellung von Phthalo-, Naphthalo- und Anthralocyanin-Chromophoren (Si-Pcs, Si-Ncs bzw. Si-ACs) mit variablen lateralen (blau) und axialen (orange) Substituenten.

Im Verlauf des Projekts wurde eine Reihe von vielversprechenden neuen kohlenstoffreichen Fulleren-Clustern, die auf der kovalenten Bindung von einem oder mehreren Fullerenen basieren, als geeignete und sinnvolle Basis und Muster etabliert. Eine vielversprechende Klasse neuer Hybridarchitekturen beruht auf der kovalenten Bindung eines Fulleren (C₆₀) an ein Hexabenzocoron. Letzteres kann als Modellverbindung für Graphen betrachtet werden. Die Synthese dieser neuen hexa-*peri*-Hexabenzocoron (HBC)-Fulleren Dyade (s. Abbildung 20) erfolgte durch die Einführung einer kovalenten Bindung zwischen dem planaren und dem sphärischen konjugierten π -System.

Außerdem wurden neue redoxaktive ionische Flüssigkeiten (IL) untersucht, die als Elektrolyte in Farbstoffzellen (DSSC) dienen. In einer weiteren Serie von Experimenten wurden Oligofullerene synthetisiert, in denen die Fullerene über kovalente Bindungen in einer sterisch definierten Weise zusammengehalten werden. Sowohl Fulleren-Monoaddukte als auch Addukte mit einem oktaedrischen Additionsmuster dienten dabei als Bausteine. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass neuartige Fullerenarchitekturen synthetisiert wurden, die sowohl hinsichtlich ihres optoelektronischen Verhaltens als auch bezüglich ihres Aggregationsverhaltens sehr vorteilhafte Eigenschaften aufweisen.

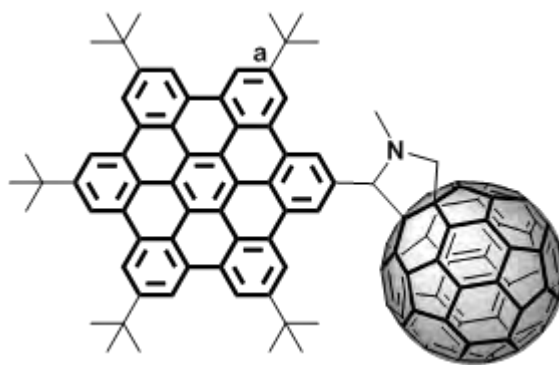


Abbildung 20: hexa-*peri*-Hexabenzocoron (HBC)-Fulleren Dyade

In einer Kooperation der AK Brabec und Guldi wurden neue Chromophore und Chromophorsysteme auf ihre Eignung für die organische Photovoltaik überprüft und hinsichtlich ihrer photophysikalischen Eigenschaften untersucht.

Transiente Absorptions-Spektroskopie-Untersuchungen an Polythiophen-Fulleren-Bulk-Heterojunction-organischen Blendfilmen, die mit einem Polymer mit niedriger Bandlücke sensibilisiert wurden

Das Konzept der Nahinfrarot-Sensibilisierung wurde erfolgreich eingesetzt, um die Lichtgewinnung in polymerbasierten Solarzellen mit großer Bandlücke zu erhöhen. Um tiefer gehende Einblicke in den Funktionsmechanismus ternärer organischer Solarzellen zu erhalten, ist ein umfassendes Verständnis des Ladungstransfers bzw. Ladungstransports in ternären Mischungen notwendig. Hier werden ternäre P3HT: PCPDTBT: PCBM Blendfilme – siehe Abbildung 21 - durch transiente Absorptionsspektroskopie untersucht. Nach der Photoanregung von PCPDTBT wurde die Übertragung positiver Polaronen von PCPDTBT auf P3HT in dem P3HT: PCPDTBT: PCBM 0,9: 0,1: 1-Blendfilm beobachtet. Dieser Vorgang beginnt teilweise schneller als 1 ps, was im Einklang mit dem Mechanismus der direkten Lochübertragung steht. Die Lochübertragung erstreckt sich jedoch über die gesamte untersuchte Zeitskala von 7500 ps mit einer dominierenden Komponente von 140 ps. Diese Beobachtung unterstützt andererseits den Mechanismus der Lochübertragung durch Diffusion.

Bei Anregungsdichten, die denen unter einer Sonne bei stationären Bedingungen entsprechen, prognostiziert die Modellierung eine Lochtransfereffizienz von mehr als 90%. Der beobachtete effiziente Lochtransfer vom Polymer mit niedriger Bandlücke zu dem Polymer mit breiter Bandlücke erklärt, warum der Kurzschlussstrom der P3HT:PCBM-Zellen bei der Zugabe von Si-PCPDTBT zunimmt, während die Leerlaufspannung unberührt bleibt. Die Füllfaktoren der ternären P3HT:Si-PCPDTBT:PCBM Mischungen sind deutlich höher als die in der entsprechenden Mischung P3HT:PCPDTBT:PCBM, aber etwas reduziert im Vergleich zu dem binären P3HT:PCBM Referenzsystem. Dies wurde durch die geringere Störung der kristallinen Struktur des Bulk-Hetero beim Vermischen von Si-PCPDTBT als im Fall von PCPDTBT erläutert.

Die Untersuchungen der Grenzflächenenergie zeigen, dass Si-PCPDTBT an amorphen Schnittstellen und P3HT Kristallite lokalisiert ist, während PCPDTBT dazu neigt, bei amorphen Schnittstellen und halbkristalline Domänen der Fulleren-Derivate zu akkumulieren. Die Ergebnisse von GISAXS und SCLC stimmen mit diesem Szenario überein. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Störung der halbkristallinen Domänen des Fulleren sich nachteiliger auf die Leistung der Solarzelle auswirkt als die Störung der Polymerdomänen. Die Leistung von ternären Solarzellen auf der

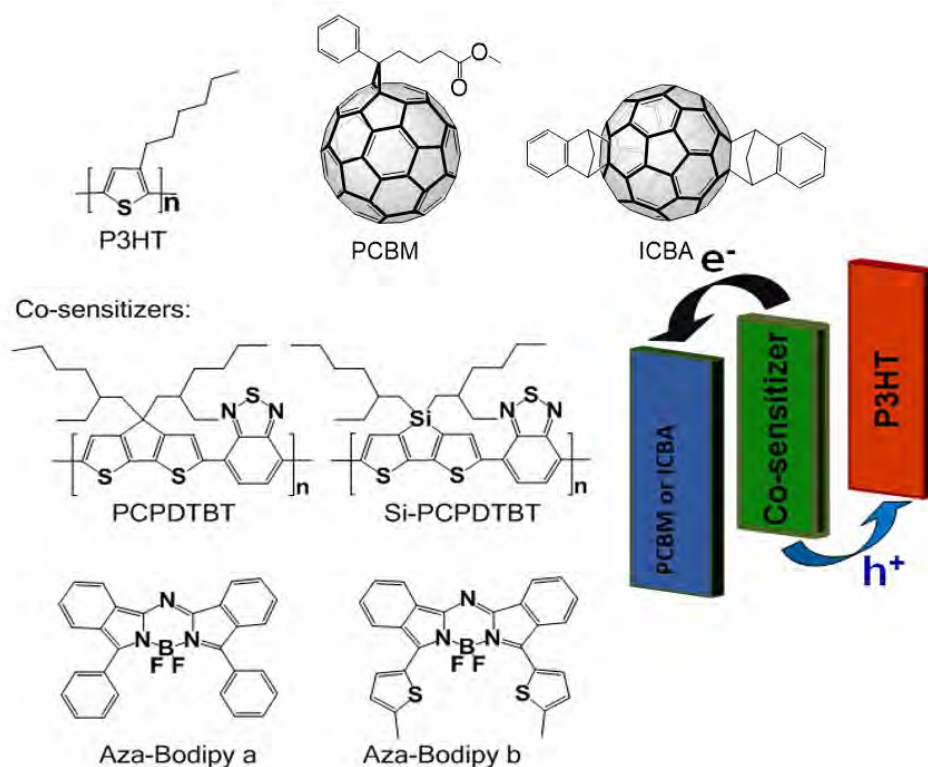


Abbildung 21: Molekulare Strukturen von P3HT, PCBM und dem experimentellen PCPDTBT, Si-PCPDTBT, Aza-Bodipy a und Aza-Bodipy b, Co-Sensibilisatoren.

Basis von P3HT:PCBM und P3HT:ICBA Host-Matrizen wurde um mehr als 25% unter Verwendung von 20 bis 40 Gew% des nahen IR-Sensibilisator Si-PCPDTBT verbessert, während kein Rückgang des Füllfaktors beobachtet wurde. Im Gegensatz dazu wurde bei Verwendung von PCPDTBT als Sensibilisator für P3HT:PCBM und P3HT:ICBA keine wesentliche Verbesserung der Solarzellen gefunden. Im letzteren Fall, verschlechterte sogar der Zusatz einer kleinen Menge an PCPDTBT zu P3HT:ICBA die Effizienz der Zelle aufgrund einer wesentlichen Abnahme von J_{sc} und FF. Diese Leistungsverluste korrelieren mit einer wesentlich verringerten Elektronenmobilität, die durch bevorzugtes Mischen von PCPDTBT mit ICBA verursacht wird. Diese Studie zeigt, wie leichte Strukturänderungen das Verhalten eines komplexen Mehrphasensystems erheblich beeinflussen können. Die vorliegende Studie kann als Leitlinie für die Festlegung von Designregeln für organische ternäre Solarzellen dienen. Es sind jedoch weitere Systeme mit unterschiedlichen elektronischen Energieniveaus, Transporteigenschaften und Kristallinität zu untersuchen.

Zwei ähnliche nahinfrarot (IR) absorbierende benzannellierte-Aza-BODIPY-Farbstoffe als Nah-IR-Sensibilisatoren für ternäre Solarzellen

Ternäre organische Solarzellen auf Basis von P3HT und PCBM, die mit zwei verschiedenen nahinfrarotabsorbierenden Aza-BODIPY-a und Aza-BODIPY-b Farbstoffen vermischt sind, siehe Abbildung 21- wurden konstruiert und charakterisiert. Die Menge dieser beiden Aza-BODIPY-Farbstoffe innerhalb der P3HT:PCBM-Matrix wurde systematisch variiert und die Eigenschaften der jeweiligen Solarzellen wurden gemessen. Die Zugabe von beiden Aza-BODIPY-Farbstoffen verstärkte die Absorption der Blends, aber nur der Zusatz von aza-BODIPY verbesserte den Wirkungsgrad der Solarzellen im nahen Infrarotbereich. Das HOMO-Niveau

von Aza-BODIPY b liegt über dem von P3HT und Ladungen werden auf Aza-BODIPY b gefangen, ohne die Möglichkeit zu haben, auf die P3HT-Matrix übertragen zu werden. Um einen solchen unerwünschten Ladungseinfang zu vermeiden, ist es wichtig, dass - wie im Fall von aza-BODIPY a - sowohl die HOMO- als auch die LUMO-Energieniveaus zwischen denen von P3HT und PCBM liegen.

Organisch-anorganische Hybrid-Solarzellen mit CdSeTe-Quantenpunkten

Hybride Solarzellen auf der Basis von pDPP5T-2- Polymeren, PCBM – siehe Abbildung 22 - und Cadmiumselenid-Tellurid (CdSeXTe1-X) Quantenpunkte (QDs) wurden hergestellt. Die photovoltaische Leistung und die optoelektronischen Eigenschaften wurden in Abhängigkeit von der QD-Beladung untersucht. Die Solarzelleneffizienz wird bis zu 5,11% für die Zellen verbessert, die 4 Gew.-% QDs enthalten. Die Verbesserung ist hauptsächlich auf die Erhöhung der Kurzschlussstromdichte (J_{sc}) zurückzuführen, die aus der Vergrößerung der Lichtabsorption resultiert. Die Ergebnisse der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigen die nicht agglomerierte Verteilung der CdSeXTe1-X-QDs in der pDPP5T-2: PCBM-Wirtsmatrix bei niedrigen QD-Konzentrationen. Transiente Absorptionsspektroskopie (TAS) zeigt eine langsamere Ladungsträgerrekombinationsrate aufgrund der Einführung von QDs in die photoaktive Schicht.

Hohe Effizienz und Stabilität von Solarzellen auf der Basis kleiner Moleküle durch Mikro-Mikrostruktur Feinabstimmung

Es wurden drei verschiedene Nachbehandlungsstrategien einschließlich thermischer Temperung (TA), Lösungsmitteldampf-Temperung (SVA) und zweistufigem Temperung (TA-SVA) für eine Bulk-Heterojunction-Solarzelle auf der Grundlage von DRCN5T und PCBM erprobt. Die unterschiedlichen Photovoltaik-Leistungen zeigten, dass der Verbund während der verschiedenen Nachbehandlungen unterschiedliche Mikrostrukturmodifikationen erfährt. Dies wurde durch Absorptionsspektroskopie, Rasterkraftmikroskopie (AFM), Energiegefilterte Transmissionselektronenmikroskopie (EFTEM), Grazing-incidence Small-angle scattering (GIWAXS) und Resonant Soft Röntgenstreuung (RSOXS) dokumentiert. Zusätzlich wurde eine optische, elektrooptische und elektronische Charakterisierung durchgeführt, um die Ladungsträgerdynamik in den unterschiedlichen Solarzellen zu beobachten. Aus der Analyse von PL- und EL-Spektren wurden die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Solarzellen als Funktion der Nachbehandlung vorhergesagt. Unter den entsprechenden Temper-Bedingungen kann das DRCN5T:PCBM-System (s. Abbildung 22) aufgrund der präzisen Feinabstimmung der nanoskaligen Morphologie hohe Wirkungsgrade von bis zu 9% erzielen.

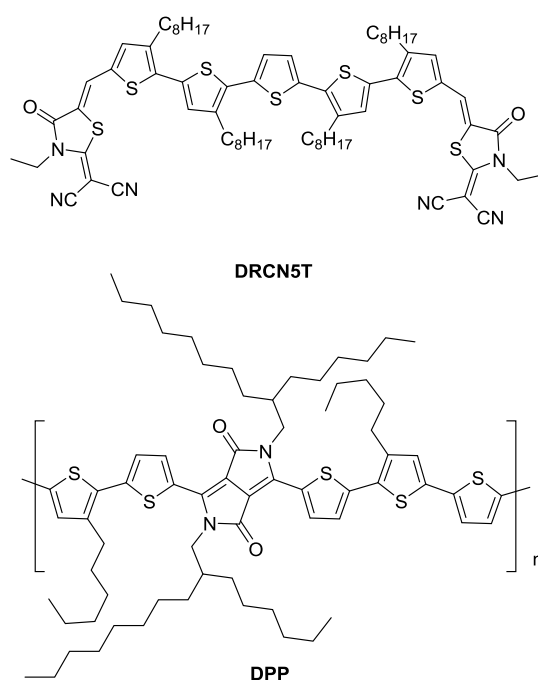


Abbildung 22: Molekulare Strukturen von DRCN5T und DPP

Der Schwerpunkt der von Dr. Voigt und Dr. Egelhaaf im TP2 geleiteten Forschungsaktivitäten liegt in der Entwicklung neuer und der Optimierung existierender Technologien auf den Gebieten Material, Prozessierung und Modularchitektur im magischen Quadrat der Photovoltaik aus Effizienz, Kosten, Lebensdauer und Design. Durch den gezielten Einsatz von Simulationen der optischen und elektrischen Eigenschaften von Zellen und Modulen gelang es im Rahmen des EnCN1, die Ursachen für die Effizienzlücke beim Transfer von Prozessen vom Labormaßstab auf die R2R-Anwendung zu identifizieren und durch geeignete Maßnahmen weitestgehend zu schließen. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei der geometrische Füllfaktor, der das Verhältnis von photoaktiver Nutzfläche zur gesamten Fläche beschreibt (Abbildung 23 links). Die Strukturierung der zuvor aufgetragenen Schichten mittels

Femtosekunden-Laser ermöglicht die platzsparende serielle Verschaltung der Zellen zum Modul. Auf diese Weise kann der geometrische Füllfaktor von ca. 80 % auf 98,5 % gesteigert werden (Abbildung 23 mitte). Dies ermöglicht die Prozessierung opaker und transluzenter organischer Solarmodule auf Glas und auf Folie mit Effizienzen von bis zu 5,3 % (opak) und 4,8 % (transluzent). Diese bislang höchsten publizierten Werten für polymerbasierte Solarmodule wurden ermöglicht durch die Kombination präziser Prozessierung und neuartiger Materialien wie z.B. hocheffizienten Donorpolymeren (Kooperation mit *Merck*) und Silbernanodrähten.

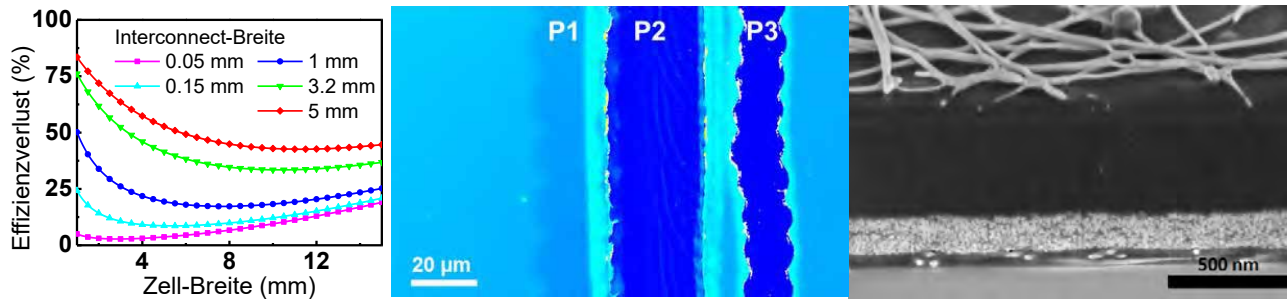


Abbildung 23: Links: Simulation des Effizienzverlusts eines Solarmoduls in Abhängigkeit der Solarzellbreite bei verschiedenen Größen des Verschaltungsbereichs zwischen zwei Solarzellen. Mitte: Mikroskopbild des durch Laserstrukturierung erzeugten Verschaltungsbereichs. Rechts: REM-Bild des Querschnitts einer Solarzelle mit Boden- und Deckelektroden aus Silbernanodrähten.

Insbesondere konnte durch den Einsatz von Boden- **und** Deckelektroden aus Silbernanodrähten eine Verbesserung der Ästhetik erzielt werden, da sich so transluzente Module ohne sichtbare siebgedruckte Elektrodengitter herstellen lassen (Abbildung 23 rechts). Auf diese Weise hergestellte Photovoltaik eignet sich ideal für die Integration in Fenster und andere Elemente an Bauwerken. Durch Polymere mit unterschiedlichen Absorptionsspektren kann auch die Farbe auf die jeweilige Anwendung abgestimmt werden. Durch den Einsatz von nichtwässrigen Silbernanodraht-Tinten im Tintenstrahl Druck konnte erstmalig der Freiform-Druck von Photovoltaikmodulen demonstriert werden (Industrieprojekt mit *Durst Phototechnik AG*, s. Abbildung 24). Die Integration von Silbernanodrähten in PEDOT:PSS-haltige Rekombinationsschichten gedruckter Tandemzellen ermöglicht deren Herstellung mittels Laminationsprozess, was sich insbesondere bei perovskithaltigen Modulen aufgrund deren Empfindlichkeit gegenüber Feuchte prozesstechnisch als großer Vorteil erweist. Schließlich trägt der Ersatz des auf der EU-Liste kritischer Materialien stehenden ITO durch die Silbernanodraht-Elektroden auch zur Kostenreduktion gedruckter PV-Module bei.



Abbildung 24: Links: Transluzente organische Solarmodule integriert in ein Isolierglasfenster (Kooperation mit Fa. Bischoff Glastechnik AG). Rechts: Freiform-Druck von Photovoltaikmodulen als Portrait-Uhr (Kooperation mit Durst Phototechnik AG).

Die aus den oben beschriebenen Optimierungsprozessen resultierenden Solarmodule wurden in Kooperation mit Projektpartnern in verschiedene Anwendungen integriert. Hierzu zählen bspw. die Integration transluzenter Module in Isolierglasfenster und dekorative Elektronik (Kooperation mit *Bischoff Glastechnik AG* bzw. *Durst Phototechnik*, s. Abbildung 24), in ein Testfahrzeug (Kooperation mit *Webasto SE*, s. Abbildung 25) sowie in textile Anwendungen (Kooperation mit *Stoll*, s. Abbildung 25).

Basierend auf den Ergebnissen des EnCN1 werden für die nächste Förderperiode v.a. eine weitere Erhöhung von Effizienz und Lebensdauer durch den Einsatz neuer Materialien und die Verwendung optimierter Bauteilarchitekturen angestrebt. Ein weiterer Schwerpunkt wird die Integration gedruckter Photovoltaikmodule in unterschiedliche Anwendungen sein. Hierbei stehen die bauwerksintegrierte Photovoltaik, Applikationen im Automotive-Bereich und die Integration in Textilien im Fokus. Dies wird u.a. erreicht durch die Entwicklung von Verfahren zum Freiform-Druck von Solarmodulen auf 2D- und 3D-Oberflächen.

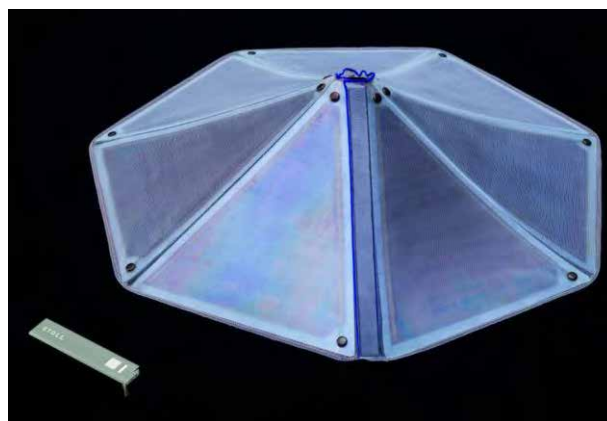


Abbildung 25: Links: Testfahrzeug mit Photovoltaikmodulen unterschiedlicher Technologien (Kooperation mit Webasto). Rechts: Integration organischer Photovoltaikmodule in ein tragbares Solarladegerät (Kooperation mit Fa. Stoll).

1.3 CIS-PPV (TP3) Prof. Dr. Peter Wellmann

Am CIS-PPV Teilprojekt der Solarfabrik sind die Arbeitsgruppen der *Profs. Wellmann (Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften 6, Materialien der Elektronik und Energietechnologie (i-MEET))*, *Hock (Lehrstuhl für Kristallographie und Strukturphysik)* und *Brabec (i-MEET)* der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg beteiligt. In diesem Teilprojekt wurde untersucht, wie durch den Einsatz sogenannter CIS-basierter anorganischer Nanopartikel Dünnschichtszellabsorber hergestellt werden können. Die Abkürzung CIS steht für das Materialsystem $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})(\text{S}_y\text{Se}_{1-y})_2$, welches in der „klassischen“ Variante aus elementaren und binären Metall-Prekursor-Schichten mit Hilfe einer Temperaturbehandlung bei bis zu 550°C zu dem Solarzellenabsorber-Halbleitermaterial durchreagiert. Der Einsatz von CIS-basierten Nanopartikeln bietet wesentliche Vorteile für die Herstellung effizienter CIS Absorberschichten. Durch die bei einem Druckprozess erfolgende Abscheidung von Metallpartikeln kommt es zu einer besseren Durchmischung der Grundkomponenten des CIS-Absorbers als es bei den heute im Vakuum abgeschiedenen Vielfachschichten der Fall ist. Davon lassen sich günstigere Phasenbildungsprozessparameter (kürzere Temperzeiten, niedrigere Prozesstemperaturen) und homogenere CIS-Schichten ableiten. Im Vordergrund des Projektes stehen die Evaluation von nanopartikelprozessierten Solarzellenmaterialien und Bauelementen. Das Einsparpotential bei der CIS-Solarzellenfertigung durch den Einsatz von Drucktechniken ist im Vergleich zu den heute im Einsatz befindlichen Vakuumbeschichtungstechniken für dieses Vorhaben hingegen als zweitrangig anzusehen.

Die wissenschaftlichen Aufgabenstellungen beinhalteten die CIS Nanopartikelsynthese (Element-Partikel und binäre CIS Absorbervorstufen), die Aufklärung der CIS-Phasenbildung (Thermodynamik, Kinetik, Strukturanalyse), die Optimierung des Temperaturvorgangs bei der CIS Absorberbildung, die Erhöhung der lateralen chemischen Schichthomogenität und die Entwicklung eines drucktechnischen CIS-Solarzellenprozesses.

CIS Nanopartikelsynthese (Element-Partikel und binäre CIS Absorbervorstufen)

Im Bereich der Nanopartikelsynthese wurden systematisch nanopartikelartige Vorstufen von CIS im Hinblick auf die Schichtbildung untersucht. Der Hauptschwerpunkt lag dabei auf der grundlegenden Aufklärung wie im Schwefel- und Selenhaltigen System dichte CIS-Schichten realisiert werden können und welche limitierenden Mechanismen dabei interferieren. Es konnten zwei Prozessrouten etabliert werden. Zum einen wurden In_2Se_3 und Cu_{2-x}Se Nanopartikelsysteme entwickelt, die in der stöchiometrisch angepassten Mischung zu CuInSe_2 reagieren. Zum anderen wurde ein System aus CuIn und Se Nanopartikel realisiert, das eine

besonders homogene CIS-Schichtabscheidung und -bildung ermöglicht. Der Einsatz von Se-Nanopartikelintinten wurde technologisch favorisiert, da sich dadurch die exakte Menge an Selen (bzw. Selenüberschuss) präzise einstellen lässt. Mit „CuIn + Se“ wurde ein nanopartikuläres Materialsystem etabliert, das sich für die drucktechnische Verarbeitung zu CIS-Solarzellenabsorber-Schichten eignet.

Aufklärung der CIS-Phasenbildung (Thermodynamik, Kinetik, Strukturanalyse)

Im Bereich der CIS-Phasenbildung wurde eine Computersimulation der Schichtbildung des CIS Solarzellenabsorbers entwickelt. Die Modellierung der Phasenbildung wurde zunächst bezogen auf die Absorber-Herstellung nach dem „Stacked Elemental Layer Verfahren (SEL)“ angewandt, weil hier experimentelle Vergleichsdaten zur Verfügung standen. Die Software kann aber auch für nanopartikuläre Systeme verwendet werden. Der zu betrachtende Schichtausschnitt wird in Zellen unterteilt. Die Kornstruktur wird mit einem zellulären Automaten beschrieben, wobei jede Zelle eine Phase als Zustand erhält. Zwei Zellen unterschiedlicher Phasen dürfen nicht nebeneinander liegen. Dazwischen muss sich eine Zelle vom Typ „Korngrenze“ befinden. Änderungen der Kornstruktur (d.h. der Zustände des zellulären Automaten) ergeben sich in Abhängigkeit der Konzentrationsänderungen. Diese entstehen durch dabei auftretende Diffusionsprozesse, welche mittels der Finiten Volumen Methode berechnet werden. Keimbildungsprozesse führen zur Erzeugung neuer Korngrenzen, welche neu entstandene Phasen begrenzen. Die Software bestimmt die latente Wärme, welche bei den Wachstumsprozessen freigesetzt wird. Somit können die Ergebnisse aus den Berechnungen direkt mit Ergebnissen aus DSC-Messungen verglichen werden (s. Abbildung 26).

Die Software wurde für den 3D-Fall entwickelt. Berechnungen wurden bisher auf 1D-Berechnungen, d.h. vertikale Diffusionsprozesse bei der Phasenbildung von CIS beschränkt. Obwohl die Software Reaktionen von beliebigen Schichtstapeln berechnen kann, ist sie für die CIS-Bildung bisher auf eine Schichtfolge Cu-Se-In (von unten betrachtet) festgelegt. Die Herstellung von CIS-Absorbern mit dem SEL-Verfahren erfolgt jedoch mit der Schichtfolge Cu-In-Se. Bei der Herstellung treten hier allerdings eine Reihe erzwungener Reaktionen auf, deren Implementierung für das Jahr 2017 vorgesehen ist. Von Bedeutung sind hier Aggregatzustandsänderungen (z.B. $\text{Se}_{\text{fest}} \rightarrow \text{Se}_{\text{flüssig}}$) sowie peritektische Zerfälle (z.B. $\text{CuSe} \rightarrow \text{Cu}_2\text{Se} + \text{Se}$). Experimentell wird auch der Kirkendall-Effekt beobachtet (Diffusionsprozesse und Porenbildung), welcher ebenfalls noch nicht implementiert wurde.

Optimierung des Tempervorgangs bei der CIS Absorberbildung und Erhöhung der lateralen chemischen Schichthomogenität

Durch den Einsatz von Se-Nanopartikelintinten ist es gelungen, die für die CIS-Phasen- und Schichtbildung erforderliche Selenmenge präzise einzustellen.

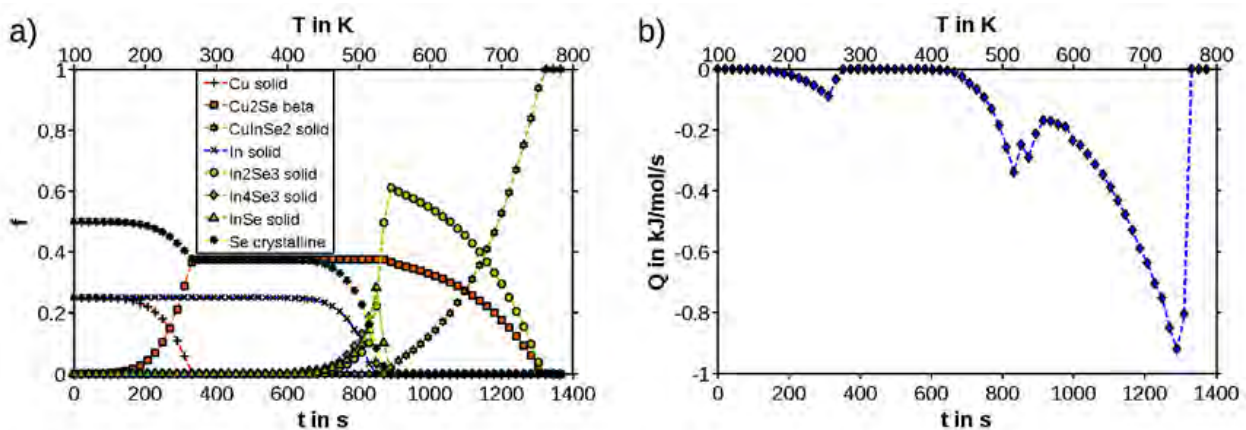


Abbildung 26: Phasenentwicklung (a) und Bildung der latenten Wärme (b) der Modellberechnung der CIS Schicht aus elementaren Metallvorstufen.

Entwicklung eines drucktechnischen CIS-Solarzellenprozesses

Im Bereich der Bauelemente wurde zum einen eine rein schwefelbasierte CIS Solarzelle realisiert. Dazu wurden CuInS₂ Nanopartikel nasschemisch abgeschieden und bei ca. 270°C thermisch behandelt. Die aktuellen Solarzellen weisen einen Füllfaktor von 64% und einen Wirkungsgrad von 3.5% auf (s. Abbildung 27).

Aus den zahlreichen Studien von vakuumbasierten CIS Solarzellen leitet sich ab, dass höhere Wirkungsgrade in Se-basierten CIS-Solarzellen beobachtet werden. Neben den unterschiedlichen elektronischen Bandlücken der beiden Halbleiter zeichnen sich Se-basierte Schichten durch defektärmere Korngrenzen-Eigenschaften aus. Erste bis auf die Molybdän-Rückelektrode vollständig nasschemisch prozessierte Solarzellen auf Basis von CuInSe₂ weisen vielversprechende Eigenschaften im Hinblick auf die vorliegende CuInSe₂ Phasenreinheit auf. Die CIS Absorberschicht wurde aus den nanopartikulären Vorstufen CuIn und Se gebildet. Die 6,25 cm² großen Minimodule aus 3 Zellen weisen allerdings noch einige Solarzellenabsorber-Shunts auf, die entweder durch eine

Restporosität in der CIS Schicht zustande gekommen sind oder mit dem noch nicht optimierten Laser-Strukturierungsprozess während der Modulstrukturierung zusammenhängen.

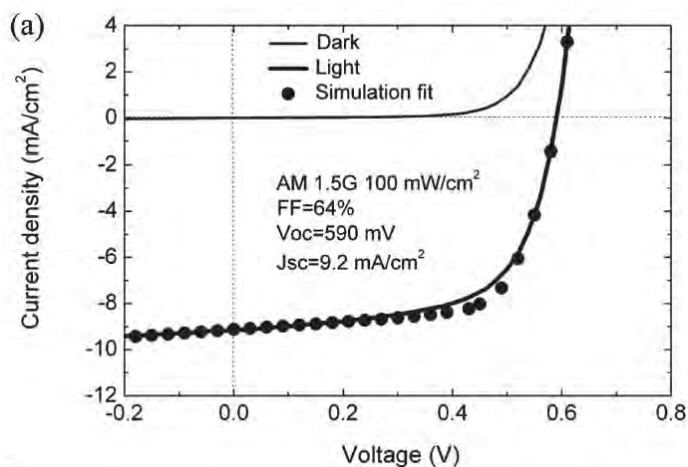
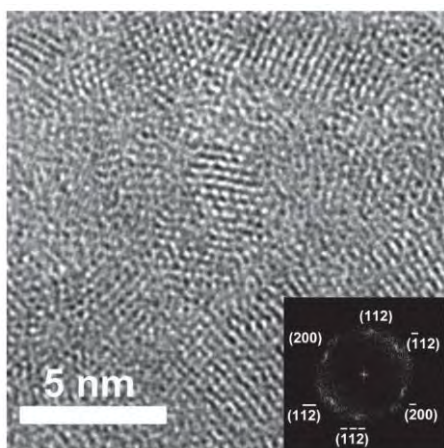


Abbildung 27: (links) Hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie (HRTEM) der nanopartikulären CuInS₂-Schicht nach dem Sintern bei 270 °C. (rechts) Strom-Spannungskennlinie und Kenndaten der CuInS₂ Test-Solarzellen-Struktur unter Beleuchtung und im Dunkelfall (nach [AZI13]).

CIS Nachfolgematerial CZTS

Das CIS-„Nachfolgematerial“ CZTS, in welchem jeweils 2 Indium-Atome der 3. Hauptgruppe im Periodensystem durch Zink und Zinn Atome der 2. und 4. Hauptgruppe ersetzt werden, wurde in einer Reihe von Forschungsarbeiten untersucht. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die Nanopartikelsynthese, die dabei auftretenden Phaseninstabilitäten und die Schichtbildung von nanopartikulären Schichten. Mit besonderer Aufmerksamkeit wurden Selen-Schwefel-Austauschreaktionen im Hinblick auf die Verdichtung der Schichtmorphologie untersucht. Ein besonders erwähnenswertes Ergebnis wurde mithilfe von Röntgenbeugungsexperimenten erzielt (s. Abbildung 28). Bei etwa 445 °C setzt eine Ordnung der Ionen auf den Kationenplätzen ein, was an dem Erscheinen der drei Beugungsreflexe 002, 101 und 110 deutlich wird. Die In-situ Beobachtung des Übergangs zwischen einem ungeordneten zu einem geordneten Zustand der CZTS Partikel kann in Zukunft wesentlich dazu beitragen aufzuklären, wie die heutige Begrenzung des Wirkungsgrads von CZTS-Solarzellen von ca. 12% überwunden werden kann.

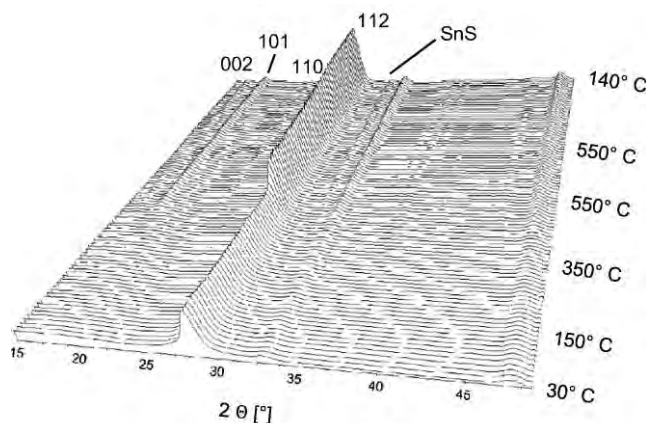


Abbildung 28: In-situ Pulver Röntgenbeugungsexperiment an CZTS Nanopartikeln: Bei etwa 445 °C setzt eine Ordnung der Ionen auf den Kationenplätzen ein, was an dem Erscheinen der drei Beugungsreflexe 002, 101 und 110 deutlich wird.

Die Fördermittel wurden vollständig ausgeschöpft.

Im Teilprojekt CIS-PPV wurden nanopartikuläre Vorstufen für die nasschemische Abscheidung und Schichtbildung von CuInSe₂ entwickelt. Selen zur Phasenbildung der Chalkopyrite wird dabei über die Gasphase oder in Form von Se-Nanopartikeln hinzugegeben. Die Anwendung in Solarzellenmodulen wird über das Projektende hinaus weiter entwickelt. Es wurde ein Softwarepaket weiter entwickelt, das die numerische Simulation der CuInSe₂ Phasenbildung einschließlich der Ausbildung von Korngrenzen in einer ersten vereinfachten Modellbildung ermöglicht. Obwohl das Programmpaket noch einige Einschränkungen in den erlaubten chemischen Reaktionen bei der Phasenbildung aufweist, handelt es sich um einen in der Literatur einzigartigen Ansatz, der nicht nur für das beschriebene Solarzellenmaterial, sondern universell für die Vorhersage der Phasen- und Schichtbildung dünner Metall- und Halbleiterschichten angewandt werden kann.

1.4 Si-PPV (TP4) Dr. Edda Stern

Im Teilprojekt Si-PPV der SOLARFABRIK DER ZUKUNFT werden lösungsbasierte Herstellungstechniken für Silizium-Schichten erarbeitet, die als Absorber in Solarmodulen eingesetzt werden können. Die Herstellung mittels Druck- bzw. Beschichtungstechniken als Alternative zu den herkömmlichen Ziehverfahren für kristallines Silizium oder Vakuum-Beschichtungsverfahren für Dünnschichtsilizium ermöglichen eine großflächige Auftragung sowie einen kontinuierlichen Herstellungsprozess (z. B. Rolle-zu-Rolle) und bieten damit ein hohes Kosteneinsparpotenzial. Ausgegangen wird hierbei zum einen von Si-Nanopartikeln und zum anderen von flüssigen Silanen.

Verarbeiten von Si-NP in flüssigen Silanen

Ein weiterer Forschungsansatz beinhaltet die Dispergierung von Si-NP in Silanen. Nach dem Beschichtungsprozess wird das Silan durch UV-Bestrahlung oligomerisiert und anschließend durch Erhitzen polymerisiert, so dass das Silan als Ladungsleiter zwischen Si-Nanopartikeln im Film fungieren kann. Mit anderen Worten wirkt das erhaltene Silanpolymer als ein Zwischen-Si-NP-leitender "Leim" und füllt die Hohlräume zwischen den quasi-sphärischen Teilchen in dem Film, was zu einer dichten Schicht von Teilchen führt, die gut miteinander verbunden sind. Die vielversprechendsten Silankandidaten für Filme guter Qualität sind das Cyclopentasilan (CPS) und das Neopentasilan (NPS) (s. Abbildung 29a und b). Es wird erwartet, dass hohe Oligomerisierungs- und Verzweigungsgrade für die Schichtleitfähigkeit vorteilhaft sind. Daher wurde die unterschiedliche Reaktivität von NPS und CPS in der kondensierten Phase zunächst mittels quantenmechanischer Born-Oppenheimer-Moleküldynamik-Simulationen mit dem semiempirischen AM1-Hamilton-Operator untersucht. CPS zeigte eine relativ geringe Reaktivität. Es wurde eine beträchtliche Fragmentierung in niedrigere Hydrosilane berechnet, bei der sich nur drei Wasserstoffmoleküle bilden (s. Abbildung 29c und e). NPS war wesentlich reaktiver, wobei das größte gebildete Molekül Si₁₁H₂₂ war. Dabei war Dehydrierung eine Hauptreaktion, die zur Bildung von neun Wasserstoffmolekülen im Verlauf der Simulation führte (s. Abbildung 29d und e). Bei der Zersetzung und Oligomerisierung von NPS finden zahlreiche radikalische Reaktionen wie Wasserstofftransfer, SiH₃Transfer oder Dimerisierung statt. Es scheint, dass der Hauptvorteil von NPS gegenüber CPS darin besteht, dass die anfängliche Dehydrierungsreaktion leichter auftritt, da alle weiteren Reaktionen das Vorhandensein von Resten erfordern.

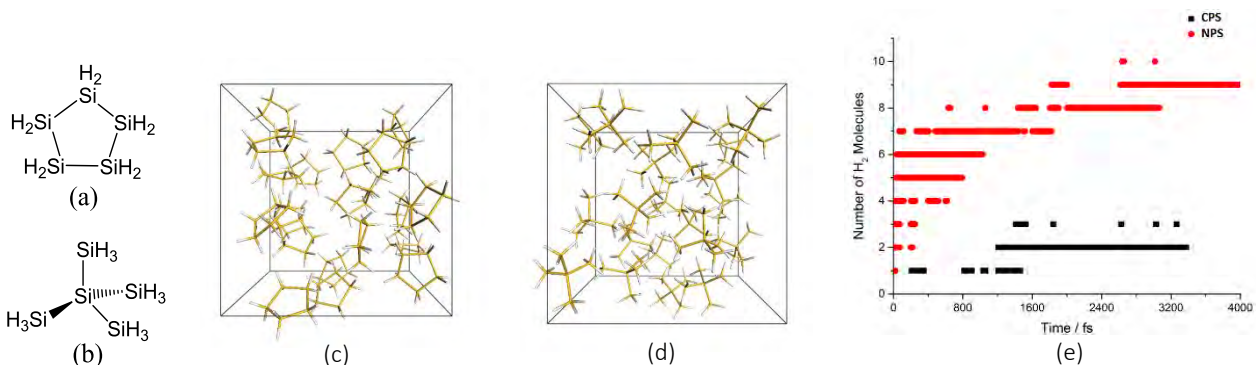


Abbildung 29: (a) Chemische Struktur von CPS; (b) chemische Struktur von NPS. Amorphe Einheitszellen von (c) CPS und (d) NPS bei simulierter Oligomerisierung; (e) Anzahl der während der simulierten Zersetzung von CPS und NPS erzeugten Wasserstoffmoleküle.

1.5 Opt-PPV (TP5) Dr. Karen Forberich

Im Teilprojekt Opt-PPV wurden unterschiedliche Aspekte des Lichtmanagements für gedruckte Solarzellen bearbeitet, mit einem Schwerpunkt auf semitransparenten Solarzellen und -modulen für die Gebäudeintegration.

Eines der untersuchten Themen waren gedruckte dielektrische Spiegel, die aus alternierenden Schichten mit hohem und niedrigem Brechungsindex bestehen. Durch geeignete Wahl der Schichtdicken lässt sich ein wellenlängenabhängiges Reflexionsmaximum erzeugen, das auf die Absorptionsspektren unterschiedlicher Solarzellenabsorber angepasst werden kann. Wenn die Lage des Reflexionsmaximums außerhalb der spektralen Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges gewählt wird, kann auf diese Weise grundsätzlich die Effizienz der Solarzelle erhöht werden, ohne die Transparenz zu erniedrigen. Aufgrund der Wahl von gedruckten Schichten eignet sich dieses Konzept hervorragend mit den gedruckten Solarzellen, die in der Solarfabrik der Zukunft hergestellt werden.

Die gemessenen Transmissions- und Reflexionsspektren der so hergestellten Schichten weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit optischen Simulationen auf, die mit der Transfermatrixmethode hergestellt wurden. Da die Transfermatrixmethode ein 1D-Modell ist, das auf homogenen Schichten und planaren Grenzflächen beruht, zeigt dies die gute optische Qualität der so hergestellten Schichten: trotz ihrer nanopartikulären Natur sind die Inhomogenitäten und Rauigkeiten vernachlässigbar gegenüber der Wellenlänge des Lichts. Lediglich auf der kurzwelligen Seite des Reflexionsmaximums ist die gemessene Transmission niedriger als die berechnete, was in erster Linie auf die Rauigkeit der Grenzflächen zurückzuführen ist. In Abbildung 30 sind der mit dem

Elektronenmikroskop aufgenommene Querschnitt eines gedruckten Spiegels aus zehn Doppelschichten zu sehen, der dessen poröse Mikrostruktur erkennen lässt, sowie die gemessene und simulierte externe Quanteneffizienz einer gedruckten semitransparenten Solarzelle, die mit verschiedenen gedruckten Spiegeln kombiniert wurde. Zu erkennen ist hier die Erhöhung der Quanteneffizienz, deren spektraler Verlauf weitestgehend mit dem berechneten idealen Verlauf übereinstimmt.

Neben der Effizienz lässt sich auch die Farbe einer semitransparenten Solarzelle durch den Spiegel beeinflussen, was sowohl mit organischen als auch mit Perovskit-Solarzellen demonstriert wurde und zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten bei der Gebäudeintegration eröffnet.

Weiterhin wurden numerische Simulationen von Silber-Nanopartikeln durchgeführt. Diese Arbeiten, für die die sogenannte FIT-THIMM-Methode (eine Variante des FDTD-Algorithmus) benutzt wurde, wurden in Kooperation mit *Professor Christoph Pflaum vom Lehrstuhl für Systemsimulation am Department Informatik* durchgeführt. Metallische Nanopartikel lassen sich durch das Beimischen in die Tinte bei der Prozessierung leicht in eine der Schichten der Solarzelle integrieren.

Aufgrund der durch plasmonische Resonanz hervorgerufenen Nahfelderhöhung und Streuung können metallische Nanopartikel zu einer Erhöhung der Absorption und damit des Stroms in der Solarzelle führen. Im Experiment ist es jedoch schwierig, zwischen Nahfeld- und Streueffekten zu unterscheiden, weil nur die gesamte Absorption gemessen werden kann. Simulationen bieten hier eine ideale Möglichkeit, beide Einflüsse auseinanderzuhalten.

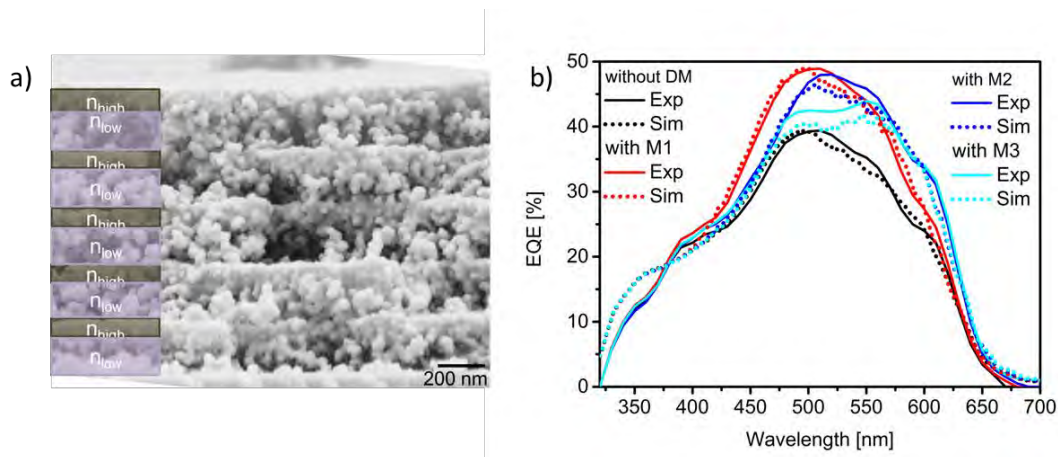


Abbildung 30: a) REM-Querschnitt eines gedruckten Spiegels, b) gemessene und berechnete externe Quanteneffizienz eines gedruckten Spiegels, der mit einer semitransparenten gedruckten Solarzelle kombiniert wurde.

Die Simulation von einzelnen Partikeln in einem absorbierenden organischen Medium zeigte, dass die relative Absorptionserhöhung nicht vom absoluten Partikeldurchmesser abhängt, sondern in erster Näherung nur vom Anteil des eingebrachten Silbers (s. Abbildung 31). Allerdings wird der positive Effekt durch eine nicht-absorbierende Schale um das Partikel, wie sie im Experiment oft vorhanden ist, wieder zunichtegemacht. Bei Simulationen der gesamten Solarzellenstruktur (d.h. einschließlich Substrat, Transportschichten und Elektroden) wurde ein deutlicher Einfluss der Position der Partikel festgestellt: während eine Positionierung an der lichtzugewandten Seite der Absorberschicht tendenziell zu einer niedrigeren Absorption aufgrund von erhöhter Reflexion führt, führt eine Positionierung an der lichtabgewandten Seite der Absorberschicht hingegen zu einer erhöhten Absorption aufgrund von vermehrter Streuung. Dieses Simulationsmodell bildet die Grundlage für das Einbringen metallischer Nanopartikel in gedruckte Solarzellen.

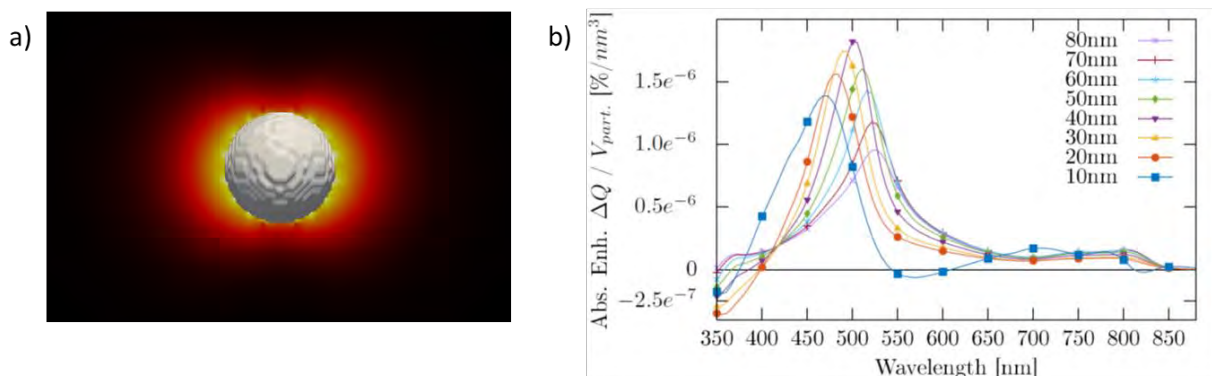


Abbildung 31: a) Visualisierung des simulierten erhöhten plasmonischen Nahfeldes in der Umgebung eines metallischen Nanopartikels. b) Simulierte Absorptionserhöhung pro Volumen, die durch Silber-Nanopartikel unterschiedlichen Durchmessers in einer organischen Absorberschicht hervorgerufen wird.

Zusätzlich zu den bereits oben beschriebenen Themen wurden Modelle zur Berechnung der Effizienz und Farbe von semitransparenten Solarmodulen entwickelt und Simulationen der experimentell hergestellten Module durchgeführt. Zur besseren Ausnutzung des solaren Spektrums wurden sogenannte Konversionsmaterialien untersucht und mit Solarzellen kombiniert, die Licht aus dem UV- und dem IR-Bereich, in dem die Solarzelle wenig oder gar nicht empfindlich ist, in den sichtbaren Bereich umwandeln, wo es absorbiert und zum elektrischen Strom beitragen kann.

Schließlich wurde in einer Studie zu einem „Smart Window“ eine semitransparente Solarzelle mit einer Schicht aus thermochromem Vanadiumdioxid kombiniert. Dieses Material zeigt oberhalb einer Temperatur von ca. 70°C einen Phasenübergang, der eine erhöhte Absorption im infraroten Bereich zur Folge hat. Diese Eigenschaft kann in Fenstern eine energiesparenden Funktion bei heißen Klimabedingungen bewirken, da bei hohen Temperaturen weniger Sonneneinstrahlung in das Gebäudeinnere gelangt und dadurch Klimaanlage ganz oder teilweise ersetzt werden können.

Alle diese Arbeiten befassen sich mit unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten semitransparenter Solarmodule, beispielsweise für die Gebäudeintegration, wodurch bislang ungenutzte Flächen für die Erzeugung nachhaltiger Energie genutzt werden können. Die entwickelten Simulationsmodelle stehen dem Energiecampus auch in seiner zweiten Förderphase zur Verfügung. Des Weiteren sollen insbesondere die dielektrischen Spiegel in Zukunft mit Hilfe einer im Rahmen des *TP 1 (Technikum)* aufgebauten Beschichtungsapparatur in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren großflächig gedruckt werden und mit großflächigen Solarmodulen kombiniert werden.

2 Schlussworte

Die Solarfabrik der Zukunft ist in den letzten fünf Jahren dem Ziel der vollständig drucktechnischen Herstellung preiswerter Solarmodule in einem für die Energiewende relevanten Maßstab entscheidend nähergekommen. Dies wurde ermöglicht durch die Kombination von grundlegender Materialforschung und Entwicklung moderner Druck- und Beschichtungstechniken.

Zunächst wurden neuartige, sowohl organische (*AK Tykwinski/FAU* und *AK Hirsch/FAU*) als auch anorganische (*AK Wellmann/FAU* und *AK Brabec/ZAE Bayern*) Materialien und Materialsysteme entwickelt, die in den Arbeitskreisen von *Prof. Halik/FAU* und *Prof. Brabec/FAU* hinsichtlich ihrer photovoltaischen Eigenschaften getestet und in den Arbeitskreisen *Guldi/FAU* und *Hock/FAU* spektroskopisch bzw. kristallographisch charakterisiert wurden. Druckbare Schichtsysteme zur Lichtmanipulation, bspw. dielektrische Spiegel und Lichtkonversionsschichten, wurden in Zusammenarbeit von Informatik (*AK Pflaum/FAU*) und Werkstoffwissenschaften (*AK Brabec/FAU*) entwickelt.

Durch die Integration der resultierenden hochentwickelten Materialsysteme in Druck-, Beschichtungs-, Strukturierungs- und Laminationsprozesse im Rolle-zu-Rolle-Verfahren am ZAE Bayern (*Prof. Brabec*) konnten optisch attraktive und großflächige Solarmodule auf der Basis organischer Polymere hergestellt werden, die weltweit erstmalig Effizienzen von mehr als 5% aufweisen und damit eine magische Grenze für die breite Anwendung, bspw. in Gebäude-Fassaden, überschreiten. Die resultierenden Solarmodule wurden gemeinsam mit Industriepartnern in zahlreiche Anwendungen im Automotive-, Gebäude-, Consumer Electronics- und Textilbereich integriert.

Die Arbeiten zur Entwicklung organischer, anorganischer und hybrider Materialsysteme für photoelektrisch aktive Schichten, Ladungstransportschichten, Elektroden, Verpackungsmaterialien und Lichtmanagementsysteme werden nach Projektende fortgesetzt, mit dem Ziel, kurzfristig Solarmodule mit Effizienzen von mehr als 10% zu drucken. Die vielversprechendsten Systeme werden auf den dafür konstruierten Anlagen der Solarfabrik in beliebiger Form auf beliebig geformte Oberflächen gedruckt und von industriellen Partnern in relevante Anwendungen integriert.

3 Veröffentlichungen

- [1] L. Lucera, P. Kubis, F. W. Fecher, C. Bronnbauer, M. Turbiez, K. Forberich, T. Ameri, H.-J. Egelhaaf, and C. J. Brabec, Guidelines for Closing the Efficiency Gap between Hero Solar Cells and Roll-To-Roll Printed Modules, *Energy Technol.*, 3, 2015, 373-384
- [2] P. Kubis, N. Li, T. Stubhan, F. Machui, G. J. Matt, M. M. Voigt, and C. J. Brabec, Patterning of organic photovoltaic modules by ultrafast laser, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 23, 2015, 238-246
- [3] L. Lucera, F. Machui, P. Kubis, H. D. Schmidt, J. Adams, S. Strohm, T. Ahmad, K. Forberich, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, Highly efficient, large area, roll coated flexible and rigid OPV modules with geometric fill factors up to 98.5 % processed with commercially available materials, *Energy Environ. Sci.*, 8, 2015, DOI: 10.1039/c5ee03315b
- [4] L. Lucera, F. Machui, H. D. Schmidt, T. Ahmad, P. Kubis, S. Strohm, J. Hepp, A. Vetter, H.-J. Egelhaaf and C. J. Brabec, Semi-transparent, large area, rigid and flexible OPV modules entirely solution processed with power conversion efficiencies of close to 5%, submitted

- [5] G. Spyropoulos, C. Ramirez Quiroz, M. Salvador, Y. Hou, N. Gasparini, P. Schweizer, J. Adams, P. Kubis, N. Li, E. Spiecker, T. Ameri, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, Organic and perovskite solar modules innovated by adhesive top electrode and depth-resolved laser patterning, *Energy Environ. Sci.* 9, 2016, 2302-2313.
- [6] T. Heumueller, W.R. Mateker, A. Distler, U.F. Fritze, R. Cheacharoen, W.H. Nguyen, et al., Morphological and electrical control of fullerene dimerization determines organic photovoltaic stability, *Energy Environ. Sci.* 9 (2016) 247–256. doi:10.1039/C5EE02912K.
- [7] A. Solodovnyk, C. Kick, A. Osvet, H.-J. Egelhaaf, E. Stern, M. Batentschuk, et al., Optimization of Solution-Processed Luminescent Down-Shifting Layers for Photovoltaics by Customizing Organic Dye Based Thick Films, *Energy Technol.* (2016). doi:10.1002/ente.201500404.
- [8] T. Uekert, A. Solodovnyk, S. Ponomarenko, A. Osvet, I. Levchuk, J. Gast, et al., Nanostructured organosilicon luminophores in highly efficient luminescent down-shifting layers for thin film photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* (2016) 1–8. doi:10.1016/j.solmat.2016.04.019.
- [9] A. Tournebize, M. Seck, A. Vincze, A. Distler, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, et al., Photodegradation of Si-PCPDTBT:PCBM active layer for organic solar cells applications: A surface and bulk investigation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* (2016). doi:10.1016/j.solmat.2016.06.026.
- [10] P. Maisch, K.C. Tam, L. Lucera, H.-J. Egelhaaf, H. Scheiber, E. Maier, et al., Inkjet printed silver nanowire percolation networks as electrodes for highly efficient semitransparent organic solar cells, *Org. Electron.* (2016). doi:10.1016/j.orgel.2016.08.006.
- [11] H.H. Ramanitra, S.A. Dowland, B.A. Bregadiolli, M. Salvador, S. Silva, D. Be, et al., Increased thermal stabilization of polymer photovoltaic cells with oligomeric PCBM, *J. Mater. Chem. C.* (2016) 8121–8129. doi:10.1039/C6TC03290G.
- [12] J. Min, X. Jiao, V. Sgobba, B. Kan, T. Heumueller, S. Rechberger, et al., High efficiency and stability small molecule solar cells developed by bulk microstructure fine-tuning, *Nano Energy.* 28 (2016) 241–249. doi:10.1016/j.nanoen.2016.08.047.
- [13] A. Vetter, F.S. Babbe, B. Hofbeck, P. Kubis, M. Richter, S.J. Heise, et al., Visualizing the performance loss of solar cells by IR thermography - an evaluation study on CIGS with artificially induced defects, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* (2016) 1001–1008. doi:10.1002/pip2749. "Diels-Alder cycloaddition of tetraphenylcyclopentadienone and 1,3,5-hexatriynes," A.-C. Sale, A.H. Murray, D. Prenzel, F. Hampel, L. De Luca, R.R. Tykwinski, *Eur. J. Org. Chem.* 2016, 2274–2283.
- [14] "A series of pyrene-substituted silicon phthalocyanines as near-IR sensitizers in organic ternary solar cells," L. Ke, J. Min, M. Adam, N. Gasparini, Y. Hou, J.D. Perea, W. Chen, H. Zhang, S. Fladischer, A.-C. Sale, E. Spiecker, R.R. Tykwinski, C.J. Brabec, T. Ameri, *Adv. Energy Mater.* 2016, 6, 1502355.
- [15] "Panchromatic quaternary polymer/fullerene BHJ solar cells, based on the novel silicon naphthalocyanine and silicon phthalocyanine dye sensitizers," L. Ke, N. Gasparini, J. Min, H. Zhang, M. Adam, S. Fladischer, K. Forberich, C. Zhang, E. Spiecker, R.R. Tykwinski, C.J. Brabec, T. Ameri, *J. Mater. Chem.*, submitted, TA-ART-10-2016-008729
- [16] H. Löslein, T. Ameri, G. J. Matt, M. Koppe, H.-J. Egelhaaf, A. Troeger, V. Sgobba, Dirk M. Guldi, Christoph J. Brabec. Transient Absorption Spectroscopy Studies on Polythiophene Fullerene Bulk Heterojunction Organic Blend Films Sensitized with a Low Band Gap Polymer. *Macromolecules Rapid Communication*, 2013, 34, 1090
- [17] J. Min, T. Ameri, R. Gresser, M. Lorenz-Rothe, D. Baran, A. Troeger, V. Sgobba, K. Leo, M. Riede, D. M. Guldi, and C. J. Brabec, Two Similar Near-Infrared (IR) Absorbing Benzannulated Aza-BODIPY Dyes as Near-IR Sensitizers for Ternary Solar Cells, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2013, 5, 5609
- [18] F. Guo, X. Zhu, K. Forberich, J. Krantz, T. Stubhan, M. Salinas, M. Halik, S. Spallek, B. Butz, E. Spiecker, T. Ameri, N. Li, P. Kubis, D. M. Guldi, G. J. Matt and C. J. Brabec, ITO-Free and Fully Solution-Processed Semitransparent Organic Solar Cells with High Fill Factors, *Advanced Energy Materials*, 2013, 3, 1062
- [19] M. Koppe, H. J. Egelhaaf, E. Clodic, M. Morana, L. Lüer, A. Troeger, V. Sgobba, D. M. Guldi, T. Ameri, C. J. Brabec, Charge Carrier Dynamics in a Ternary Bulk Heterojunction System Consisting of P3HT, Fullerene, and a Low Bandgap Polymer, *Advanced Energy Materials*, 2013, 3, 949
- [20] T. Ameri, P. Khoram, T. Heumueller, D. Baran, F. Machui, A. Troeger, V. Sgobba, D. M. Guldi, M. Halik, S. Rathgeber, U. Scherf, C. J. Brabec, Morphology analysis of near IR sensitized polymer/fullerene organic solar cells by implementing low bandgap heteroanalogue C-/Si-PCPDTBT, *Journal of Materials Chemistry A: Materials for Energy and Sustainability*, 2014, 2, 19461
- [21] J. Min, X. Jiao, V. Sgobba, B. Kan, T. Heumueller, S. Rechberger, E. Spiecker, D. M. Guldi, X. Wan, Y. Chen, H. Adeb, C. J. Brabec, High efficiency and stability small molecule solar cells developed by bulk microstructure fine-tuning, *Nano Energy*, 2016, 28, 241
- [22] R. Soltani, A. A. Katbab, K. Schaumberger, N. Gasparini, C. J. Brabec, S. Fladischer, E. Spiecker, A. G. Alabau, A. Ruland, A. Saha, D. M. Guldi, V. Sgobba, T. Ameri, *Journal of Material Chemistry C, Materials for optical, magnetic and electronic devices*, submitted
- [23] Ulrike Künecke, Stefan Jost, Robert Lechner, Helmut Vogt, Andreas Heiß, Jörg Palm, Peter Wellmann; SEM examination of the impact of laser patterning on microscopic inhomogeneities of RTP processed Cu(In,Ga)(Se,S)₂ absorbers; *Thin Solid Films* 535 (2013) 97-101.
- [24] Stefan A. Möckel, Astrid Hölzing, Rainer Hock, Peter J. Wellmann; In-situ phase formation study of CIS absorber layers from CuIn-nanoparticle and evaporated selenium; *Thin Solid Films* 535 (2013) 133-137.

- [25] H. Azimi, T. Heumüller, A. Gerl, G. Matt, P. Kubis, M. Distaso, R. Ahmad, T. Akdas, T. M. Richter, W. Peukert, C.J. Brabec; Relation of Nanostructure and Recombination Dynamics in a Low-Temperature Solution-Processed CuInS₂ Nanocrystalline Solar Cell; *Advanced Energy Materials* 2013, [doi: 10.1002/aenm.201300449].
- [26] Marco Brandl, Rameez Ahmad, Monica Distaso, Hamed Azimi, Yi Hou, Wolfgang Peukert, Christoph J. Brabec, Rainer Hock; In-situ X-ray diffraction analysis of the recrystallization process in Cu₂ZnSnS₄ nanoparticles synthesised by hot-injection; *Thin Solid Films*, doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.077
- [27] André Zweschke, Peter J. Wellmann, Numerical Reactive Diffusion Modeling of Stacked Elemental Layer Rapid Thermal Annealed Chalcopyrite Absorber Layer Formation, *Thin Solid Films* 582 (2015) 397–400, DOI:10.1016/j.tsf.2014.11.002
- [28] Ulrike Künecke, Christina Hetzner, Stefan Möckel, Peter Wellmann, Characterization of Kesterite Thin Films fabricated by Rapid Thermal Processing of Stacked Elemental Layers using spatially resolved Cathodoluminescence, *Thin Solid Films* 582 (2015) 387–391, DOI: 10.1016/j.tsf.2014.10.063
- [29] Stefan A. Möckel, Tobias Wernicke, Matthias Arzig, Philipp Köder, Marco Brandl, Rameez Ahmad, Monica Distaso, Wolfgang Peukert, Rainer Hock, Peter J. Wellmann, Low Temperature Formation of CuIn_{1-x}GaxSe₂ Solar Cell Absorbers by All Printed Multiple Species Nanoparticulate Se + Cu-In + Cu-Ga Precursors, *Thin Solid Films* 582 (2015) 60–68, DOI: 10.1016/j.tsf.2014.11.060
- [30] Ahmad, Rameez; Brandl, Marco; Distaso, Monica; Herre, Patrick; Spiecker, Erdmann ; Hock, Rainer; Peukert, Wolfgang, A comprehensive study on the mechanism behind formation and depletion of Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) phases, *Crystengcomm* 17 (36), 6972-6984 (2015)
- [31] Brandl, Marco; Ahmad, Rameez ; Distaso, Monica; Azimi, Hamed; Hou, Yi; Peukert, Wolfgang ; Brabec, Christoph J.; Hock, Rainer, In-situ X-ray diffraction analysis of the recrystallization process in Cu₂ZnSnS₄ nanoparticles synthesised by hot-injection, *Thin Solid Films* 582, 269-271 (2015)
- [32] H. Azimi, S. Kuhri, M. S. Stahl, Y. Hou, D. M. Guldi, and C. J. Brabec, Elucidating the Excited-State Properties of CuInS₂ Nanocrystals upon Phase Transformation: Quasi-Quantum Dots Versus Bulk Behavior, *Adv. Electron. Mater.*, 2015, DOI: 10.1002/aelm.201500040
- [33] F. Guo, P. Kubis, T. Przybilla, E. Spiecker, A. Hollmann, S. Langner, K. Forberich, C.J. Brabec. Nanowire Interconnects for Printed Large-Area Semitransparent Organic Photovoltaic Modules, *Adv. En. Materials*, 5, 1401779, 2015
- [34] K. Forberich, F. Guo, C. Bronnbauer, C.J. Brabec. Efficiency Limits and Color of Semitransparent Organic Solar Cells for Application in Building- Integrated Photovoltaics, *Energy Technology*, 8, 1051, 2015
- [35] F. Guo, S. Chen, Z. Chen, H. Luo, Y. Gao, T. Przybilla, E. Spiecker, A. Osvet, K. Forberich, C.J. Brabec. Printed Smart Photovoltaic Window Integrated With an Energy-Saving Thermochromic Layer, *Advanced Optical Materials*, 3, 1524, 2015
- [36] C. Bronnbauer, J. Hornich, N. Gasparini, F. Guo, B. Hartmeier, N.A. Luechinger, C. Pflaum, C.J. Brabec, K. Forberich. Printable dielectric mirrors with easily adjustable and well-defined reflection maximum for semi-transparent organic solar cells, *Advanced Optical Materials*, 3, 1424, 2015
- [37] C. Bronnbauer, N. Gasparini, C. J. Brabec, K. Forberich. Guideline for Efficiency Enhancement in Semi-Transparent Thin-Film Organic Photovoltaics with Dielectric Mirrors, *Adv. Opt. Mater.*, 4, 1098, 2016.
- [38] C. O. Ramírez Quiroz, C. Bronnbauer, I. Levchuk, Y. Hou, C. J. Brabec, K. Forberich. Coloring Semitransparent Perovskite Solar Cells via Dielectric Mirrors, *ACS Nano*, vol. 10, pp. 5104–5112, 2016.
- [39] J. Hornich, C. Pflaum, C. Brabec, K. Forberich. Numerical study of plasmonic absorption enhancement in organic semiconductor absorbers, *J. Appl. Phys.* 120, 113102, 2016

4 Patente

- [1] V. Sgobba; A. Makhdoom; E. Stern; Nidia Gawehns; H.-J. Egelhaaf; C. J. Brabec. Verfahren zum Entfernen einer Oxidschicht bei Silizium-Nanopartikeln; DE 10 2016 216 125.3; angemeldet
- [2] H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, F. Hoga, P. Kubis, Removal of conductive spikes from electrodes by electrical heating; angemeldet
- [3] K. Forberich, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, L. Lucera; Kontinuierliches Druckverfahren zur Herstellung von alternierenden Schichtsystemen mit beliebig vielen Schichten; angemeldet
- [4] G. Spyropoulos, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, T. Ameri, M. Salvador; Method for fabricating a solar module, sub-laminate for fabricating a solar module and solar module; angemeldet
- [5] G. Spyropoulos, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, T. Ameri, M. Salvador; Fabrication of tandem solar cells by lamination of the constituent sub-cells; angemeldet



MATSOL

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</p> <p>Department Werkstoffwissenschaften (WW)</p> <p>Lehrstuhl für metallische Werkstoffe (WW2)</p> <p>Lehrstuhl für Glas und Keramik (WW3)</p> <p>Lehrstuhl für Werkstoffe Elektrotechnik und Elektronik (WW6)</p> <p>Department Maschinenbau (MB)</p> <p>Lehrstuhl für technische Mechanik (LTM)</p> <p>Zentrum für angewandte Energieforschung e.V.</p> <p>Erneuerbare Energien</p>	<p>TP1: Thermomechanische Modellierung und Simulation hybrider Fügestellen (Prof. Dr. Paul Steinmann/FAU-WW)</p> <p>TP2: Zellulare Superlegierungen (Prof. Dr. Carolin Körner/FAU-WW)</p> <p>TP3: Oberflächenhärtung gekrümmter Glaskomponenten (Prof. Dr. Dominique de Ligny/FAU-WW, vormals Prof. Wondraczek)</p> <p>TP4: Zellulare Keramiken für effiziente Funktionsstrukturen (Prof. Dr. Peter Greil/FAU-WW)</p> <p>TP5: Entwicklung beschleunigter Alterungstests (Prof. Dr. Christoph Brabec/FAU-WW)</p> <p>TP6: Thermophysikalische Auslegung von Hochtemperaturkomponenten und -systemen (Prof. Dr. Christoph Brabec/FAU-WW)</p> <p>TP7: Hybride Dickschicht-Systeme zur spektralen Konversion (Prof. Dr. Christoph Brabec/FAU-WW)</p> <p>TP8: Prüflabor „Materialkontakte und Hochtemperaturprüfung“ (Prof. Dr. Christoph Brabec/FAU-WW)</p>

Projektbericht EnCN1

Das Projekt MATSOL beschäftigt sich mit der Ent- und Weiterentwicklung von Materialien/Bauteilen zur Anwendung im Bereich erneuerbarer Energie mit dem Ziel der Lebensdaueroptimierung und Effizienzsteigerung der Materialien bzw. Bauteilen. Ein Fokus dabei sind Hochtemperaturmaterialien, insbesondere in Bezug auf Solarthermische Kraftwerke (Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke). Die Forschungsergebnisse sind aber auch in anderen Bereichen, wie z. B. thermochemischer Energiespeicherung, von Nutzen.

Der Bereich Zellulare Superlegierungen entwickelte dabei optimierte Bauformen für solarthermische Kraftwerke, während im darauf aufbauenden Forschungsprojekt optimierte Beschichtungen zur Nutzung in solchen Anlagen erforscht wurden. Komplementär dazu wurde spezielle Glasstrukturierung untersucht, so dass eine verbesserte Lichteinkopplung ins Bauteil erreicht wird. Solche „intelligente“ Bauteile inklusive funktionaler Beschichtung hätten großes Potential zur Anwendung neuer thermochemischer Speicher, deshalb wurde dazu eine Konzeptstudie ausgearbeitet. Mit dem Ziel der zusätzlichen Abwärmenutzung am solarthermischen Kraftwerk wurde Grundlagenforschung an Thermoelektrikas durchgeführt. Zusätzlich wurden im Projekt die benötigte Messtechnik sowie Prüfstände entwickelt, mit denen die Lebensdauer der Bauteile im Labor extrem beschleunigt vermessen werden können. Schließlich wurde eine Softwareumgebung programmiert, mit der am Computer das Verhalten der Bauteile simuliert und somit das Design der Bauteile optimiert werden kann.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Christoph Brabec
Friedrich-Alexander- Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Christoph.Brabec@encn.de

Telefon
+49 9131 / 85 25426

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/h6r3su6>

1 Zellulare Superlegierungen

1.1 Nutzung neuer zellulärer Strukturen

Die nach der Adaptierung des Projektes MATSOL (2012) in den Fokus geratenen Strukturen für volumetrische Solarreceiver verlangen nach Hochtemperatur (HT) stabilen Materialien mit einer hohen Stabilität gegen thermische Ermüdung. Im Rahmen des MATSOL-Projektes wurden neben HT-Materialien (Kapitel 1.2 Hochtemperatur Legierungen) auch neue zellulare Strukturen identifiziert, die das Potenzial besitzen, erheblich bessere Eigenschaften bei lokaler thermischer Belastung zu zeigen. Hierbei erfolgte

die Untersuchung von chiralen Strukturen, welche sich durch ihre inhärente negative Querkontraktion auszeichnen, hinsichtlich der Reduzierung von thermischen Spannungen. Erste Erfolge hierzu konnten in einem numerischen Vergleich nach der Finiten Element Methode (FEM) von chiralen und einfach kubischen Einheitszellen bereits im Zweidimensionalen aufgezeigt werden. Weiterführende Simulationen mit der FEM-Software *Comsol* bestätigten die Reduzierung von thermisch induzierten Spannungen durch die Verwendung einer chiralen statt einer einfachen kubischen Einheitszelle auch für dreidimensionale Gitterstrukturen, siehe Abbildung 32.

Abbildung 32: Thermische Spannung in Gitterstrukturen und Ergebnisse der Berechnungen für die entstehende von Mises Vergleichsspannung für ein kontinuierliches Heizen der zentralen Einheitszelle für 20 s. Nach dieser Zeit herrscht in den Strukturen eine maximale Temperatur von 1076 °C. Chirale Strukturen sind infolge ihrer Topologie in der Lage, die entstehenden Spannungen um einen Faktor von 3,3, verglichen mit einer einfach kubischen Struktur, zu verringern. [21]

Neben der spannungsreduzierenden Wirkung chiraler Zellen konnten die hierfür verantwortlichen Verformungsmechanismen identifiziert werden. Hierbei handelt es sich um eine Spannungsreduzierung durch eine interne Verformung der chiralen Struktur über rotierende Knotenpunkte und biegende Zellstege. Dieser Verformungsmechanismus ist ebenfalls verantwortlich für das auxetische Verhalten (negative Querkontraktion) chiraler Gitterstrukturen. Damit konnte gezeigt werden, dass für die Reduzierung der thermischen Spannung die negative Querkontraktionszahl die entscheidende Rolle spielt. Weiterhin konnte durch numerische Berechnungen der Einfluss von gehinderten thermischen Ausdehnungen untersucht werden. Wird ein thermisch belastetes Material in seiner Ausdehnung gehemmt, entstehen hohe thermische Spannungen.

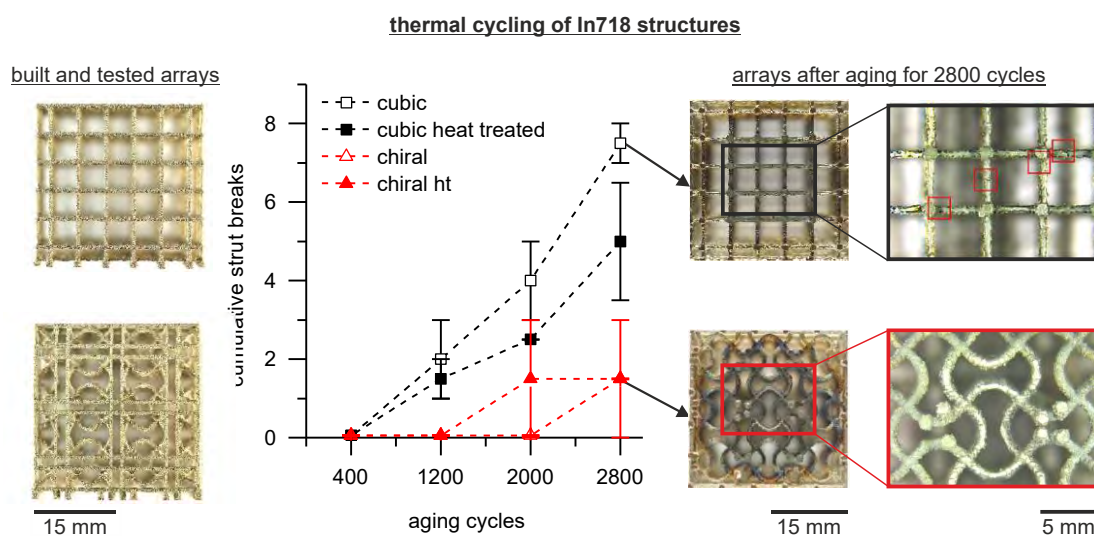


Abbildung 33: Experimenteller Vergleich einfach kubischer und chiraler Strukturen aus der Ni-Basis Superlegierung In718 unter thermischer Zyklisierung. Aufgetragen ist hierbei die Anzahl an detektierten Stegbrüchen über die gefahrenen Zyklen. Die thermische Zyklisierung erfolgte im Schnellalterungsstand des EnCN unter Bedingungen, die an die Einsatzbedingungen eines solarthermischen Receivers angelehnt wurden. Chirale Strukturen zeigen die bereits aus der Simulation bekannten Vorteile und weisen daher einen geringeren Einfluss der gefahrenen Alterungszyklen auf.

Da eine thermische Ausdehnung von Bauteilen innerhalb einer Baugruppe faktisch nie frei gegeben ist, sollten Receiver-Strukturen möglichst unabhängig von solchen Restriktionen arbeiten können. Es konnte numerisch gezeigt werden, dass chirale Strukturen eben diese Freiheit von etwaigen Einspannungen aufzeigen und somit ein hohes Potential als neue Absorber-Strukturen besitzen. Letztendlich erfolgte eine Validierung der durchgeführten numerischen Berechnungen mit erfolgreicher experimenteller Bestätigung. Hierbei wurden Bestrahlungsversuche im EnCN-eigenen Schnellalterungsprüfstand mit im Selektiven Elektronenstrahl-schmelzen gebauten Versuchsstrukturen aus der Ni-Basis Superlegierung Inconel 718 (In718) durchgeführt. Die dabei mehrfach aufgeheizten und abgekühlten (mehrere tausend Zyklen) Gitterstrukturen wurden nach der Alterung hinsichtlich eventuell auftretender Stegbrüche und den resultierenden mechanischen Eigenschaften untersucht. In Abbildung 33 sind exemplarische Ergebnisse der Studie dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Analyse der Stegbrüche innerhalb der In718-Strukturen in Abhängigkeit der gefahrenen Alterungszyklen.

Ein direkter Vergleich zwischen einfach kubischen und chiralen Strukturen zeigte eine verringerte Neigung der chiralen Gitter zu Stegbrüchen. Weiterhin zeigen chirale Strukturen lediglich einen geringen Einfluss der beschriebenen Alterung auf die mechanischen Eigenschaften, was über Druckversuche vor und nach der Alterung gezeigt werden konnte. Infolge der im Rahmen des MATSOL-Projektes erhaltenen Ergebnisse kristallisieren sich chirale Strukturen als potentieller Lösungsansatz zur Erhöhung der Standzeit volumetrischer solarthermischer Receiver-Strukturen heraus.

1.2 Hochtemperatur Legierungen

Neben der Forschung an neuen Strukturen für volumetrische Solarreceiver erfolgten ebenfalls Untersuchungen mit Hochtemperatur stabilen Materialien. Neben der Ni-Basis Superlegierung In718 konnten im Rahmen eines Industrieprojektes erste Versuche zur Verarbeitung von Eisenaluminiden durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um intermetallische Phasen aus Eisen und Aluminium, namentlich FeAl und Fe₃Al. Eisenaluminide gelten infolge ihres intermetallischen Charakters, ihrer hohen Schmelztemperatur (1350°C – 1500°C) sowie einer hohen Beständigkeit gegen korrosive und oxidative Angriffe als vielversprechendes HT-Material. Durch die vergleichsweise geringeren Kosten der zur Erzeugung nötigen Elemente Fe und Al gelten Eisenaluminide als potentieller Ersatz für hochpreisige Ni-Basis Superlegierungen. Die bisher diffizile Prozessierbarkeit von Eisenaluminiden beschränkte jedoch die technische Anwendung dieser Materialklasse. Im Rahmen von MATSOL erfolgten daher Versuche, Eisenaluminide über die relativ junge Prozessroute des Selektiven Elektronenstrahl-schmelzens (SEBM) zu verarbeiten. Die Prozessbedingungen des SEBM, wie etwa eine konstant erhöhte Prozesstemperatur sowie langsame Abkühlbedingungen von dieser und die Verarbeitung unter Vakuumatmosphäre begünstigen die Prozessierung von Eisenaluminiden. Im Rahmen von MATSOL konnte die Verarbeitung der binären Legierung FeAl16 (alle Angaben in Gew.%) über SEBM Ende 2014 gezeigt und ein erstes grobes Prozessfenster zur Herstellung dichter Proben erarbeitet werden, siehe Abbildung 34. Die erzeugten Proben weisen hierbei ein stark ausgeprägtes kolumnares Gefüge mit einer Kornlänge (in Aufbaurichtung) von mehreren Millimetern und Kornbreiten von mehreren hundert Mikrometern auf. Das via SEBM hergestellte binäre Material zeigt hierbei Härten zwischen 290 und 350 HV0.3. Ein Vergleich mit anderen Herstellungsverfahren hinsichtlich mechanischer Eigenschaften zeigt, dass die im SEBM hergestellten Proben neben einer gesteigerten Streckgrenze eine um den Faktor 2 gesteigerte Bruchdehnung besitzen.

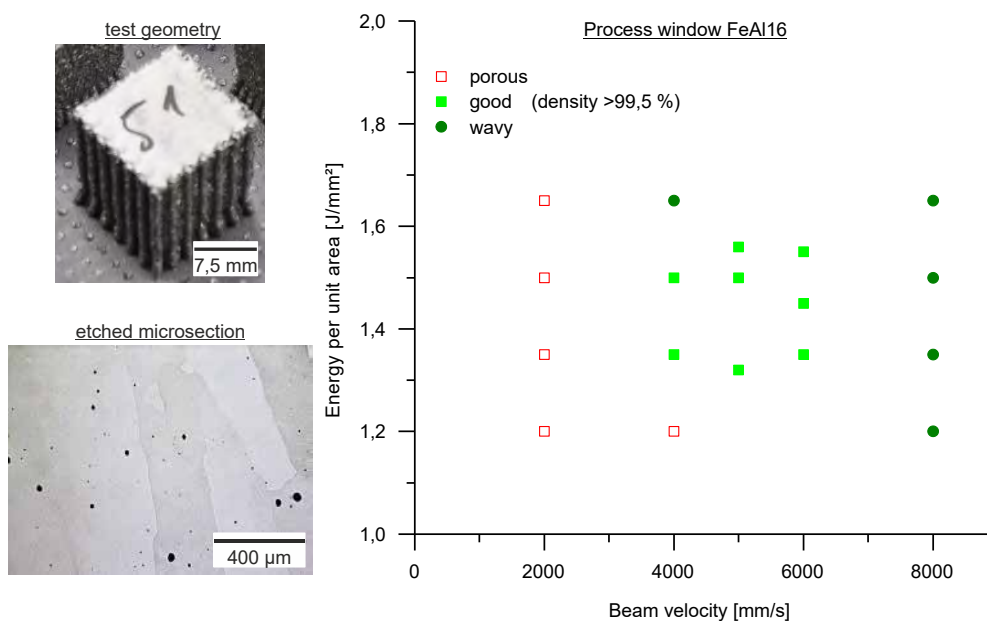


Abbildung 34: Gebaute Probengeometrie, geätzter Schliff und erstes Prozessfenster für die binäre Eisenaluminidlegierung FeAl16. Es konnten erfolgreich dichte und rissfreie Proben erzeugt werden. FeAl16 zeigt in Aufbaurichtung elongierte Körner.

Darauf aufbauend erfolgte die Untersuchung der technisch relevanteren quaternären Legierung FeAl₁₇Ti₅B_{0,3}. Auch für diese Legierung konnte erfolgreich ein stabiler Prozess sowie geeignete Schmelzparameter für die Herstellung von dichten und rissfreien Proben ermittelt werden, siehe Abbildung 35.

Die erzeugten Proben zeigen hierbei ein feinkristallines, gleichachsiges Gefüge mit Korngrößen zwischen 5 µm und 20 µm. Neben einem Grundgefüge aus Fe₃Al zeigen sich auch TiB₂-Ausscheidungen. Mechanische Untersuchungen der im SEBM hergestellten FeAl₁₇Ti₅B_{0,3}-Proben ergeben eine Härte zwischen 350 und 400 HV_{0,3}.

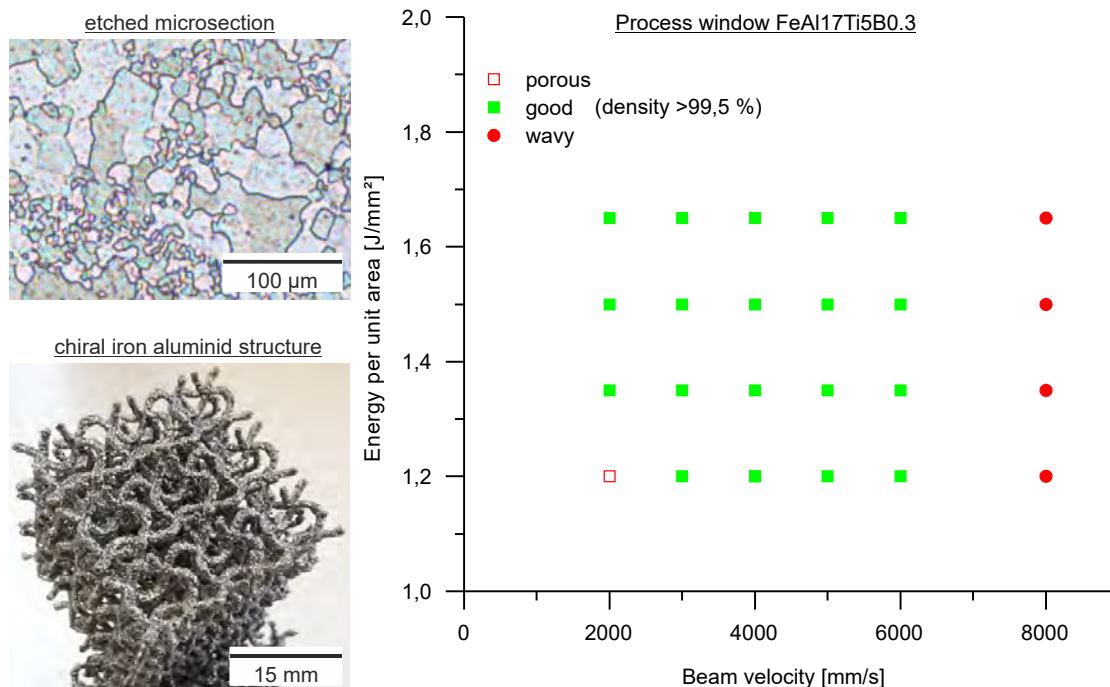


Abbildung 35: Das Prozessfenster für die quaternäre Eisenaluminidlegierung FeAl₁₇Ti₅B_{0,3} sowie eine Beispielaufnahme eines geätzten Schliffes. Die Mikrostruktur ist hierbei feinkörnig und gleichachsig. Ebenfalls abgebildet ist eine erste chirale Struktur aus diesem Hochtemperatur-Material.

2 Hochtemperaturstabile, spektral selektive Beschichtungen für Solarabsorber

Hochtemperaturprozesse in der Energieerzeugung, -konversion und -speicherung eröffnen oftmals eine signifikante Steigerung der Effizienz gegenüber ihrer Niedrigtemperaturvarianten. Allerdings geht der Trend zur Effizienzsteigerung mittels Temperatursteigerungen Hand in Hand mit steigenden Anforderungen an die verwendeten Materialsysteme. Keramische Werkstoffe erfüllen die notwendigen thermischen, chemischen und mechanischen Voraussetzungen. Für Applikationen in der Energieerzeugung und -konversion wie z.B. in chemischen Prozessen sind große Oberflächen und definierte Strömungsprofile notwendig. Das Teilprojekt 4 „Zelluläre Keramiken für effiziente Funktionsstrukturen“ befasste sich mit der Entwicklung von keramischen Werkstoffen für Hochtemperaturprozesse in der Energieerzeugung sowie der Formgebung bzw. der Anpassung dieser Werkstoffe an zelluläre Geometrien, zur Gewährleistung der Einsetzbarkeit in strömungsbasierten Anwendungen.

Der Fokus des Teilprojekts lag auf der Energieerzeugung in solarthermischen Anlagen, in denen konzentrierte Sonnenstrahlung von sog. Receivern absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Dabei wird die Wärme zur Erzeugung von Strom oder chemischer Energieträger (z.B. Wasserstoff) genutzt.

Für die solarthermische Stromerzeugung existieren verschiedene Kraftwerkstypen die sich hinsichtlich ihrer Konzentrationsfaktoren und Arbeitstemperaturen unterscheiden. Turmkraftwerke zeichnen sich durch sehr hohe Arbeitstemperaturen (600-800 °C) aus. Allerdings ist es zur Effizienzsteigerung und Erreichung von Kostenzielen unumgänglich die Arbeitstemperatur auf 1000°C zu steigern.

Limitierende Faktoren bei den vorhandenen Receivermaterialien sind derzeit entweder die geringe Temperaturstabilität bei metallischen Receivern oder ungünstige optischen Eigenschaften bei keramischen Receivern aus Siliciumcarbid. Diese sollen ein wellenlängenabhängiges optisches Verhalten besitzen. Dabei wird im Idealfall das Sonnenspektrum ($\lambda=0,25-2,5 \mu\text{m}$) absorbiert und die thermische Strahlung ($\lambda>2,5 \mu\text{m}$) reflektiert (sog. solarselektives Verhalten).

Ausgehend von den genannten Anforderungen an neue Werkstoffe war das Forschungsziel des Projekts die Entwicklung höchstabsorbierender oder solarselektiver Beschichtungen für solarthermische Hochtemperaturanwendungen. Durch eine optisch aktive und optimierte Beschichtung kann Siliciumcarbid (SiC) als Receivervollmaterial weiterhin genutzt werden. Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) wurden als Basismaterial für diese Beschichtungen gewählt, da deren Nanostruktur ideale Voraussetzungen hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, hoher Oberfläche und hoher Absorption bietet.

In der ersten Phase des Projekts erfolgte die Entwicklung geeigneter wässriger CNT-Dispersionen welche die Möglichkeit eröffnet zwei- und dreidimensionale Substrate mit kostengünstigen Sprüh-, Tauch- oder Filtrationsprozessen zu beschichten. Die entwickelten CNT-Dispersionen wurden über die Variation der eingesetzten Dispergatorchemikalien hinsichtlich maximaler Absorption mittels statistischer Versuchsplanung optimiert. Diese Beschichtungen erreichten Absorptionswerte >98 % im Bereich der solaren Strahlung und sind damit vollumfänglich als Schwarzkörperbeschichtungen geeignet. Ebenso wurde die thermische Stabilität bis 1000 °C nachgewiesen. Die Ergebnisse wurden erfolgreich veröffentlicht [Weisenseel et al., Adv. Eng. Mat 18 (2016)].

In der zweiten Phase des Projekts erfolgte die Weiterentwicklung des optischen Verhaltens der Beschichtungen durch die Optimierung der Reflexion der thermischen Strahlung. Dazu wurden die CNT-Dispersionen mit wasserlöslichen Zirkon- und Hafniumverbindungen versetzt, welche sich in Anwesenheit der CNTs in der darauffolgenden thermischen Behandlung zu solarselektiven Carbidgebindungen (ZrC, HfC) umsetzten. Durch gezielte Einstellung der Prozessparameter wurde dabei nicht nur die Carbidthese erfolgreich umgesetzt und mittels Parallelstrahl-Röntgendiffraktometrie nachgewiesen, sondern auch der Erhalt der Nanostruktur der CNTs erreicht. Somit verfügen die CNT-Carbid-Kompositschichten über das gewünschte optische Verhalten, eine hohe Oberfläche und gute thermische Leitfähigkeit. Durch die Optimierung der Prozessparameter konnte eine solare Absorption >90 % sowie eine thermische Reflexion und damit auch Emission <50 % erreicht werden. Diese hochtemperaturstabilen Materialien weisen deutlich verringerte Strahlungsverluste gegenüber dem Stand der Technik auf. Das Ziel zur Entwicklung einfach zu applizierender Beschichtungen auf SiC, mit solarselektivem optischen Verhalten, wurde somit erfolgreich erreicht. Die Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgt zeitgleich zur Erstellung dieses Berichts.

Im Rahmen der Entwicklung der CNT-Carbid-Komposite wurde des Weiteren der Einfluss von Silicium, welches aus dem SiC-Substrat bei hoher Temperatur austritt, auf die Carbidsynthese untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die gezielte Freisetzung von Si während der Synthese die Carbidausbeute um 400 % gesteigert werden kann. Dies ermöglicht nicht nur die Verringerung der Prozesszeiten oder –temperaturen des Herstellungsprozesses, sondern auch in industriellen Herstellungsverfahren, wodurch signifikante Energiekosteneinsparungen erfolgen könnten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden erfolgreich veröffentlicht [Weisenseel et al., Adv. Eng. Mat. (2016), in press].

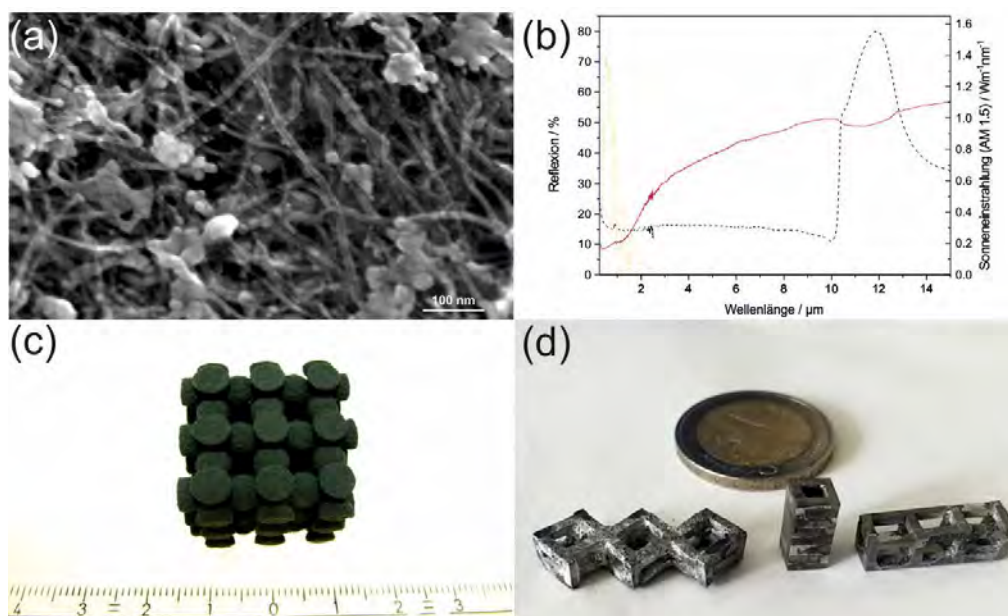


Abbildung 36: Überblick über die erzielten Ergebnisse im Projekt „Hochtemperaturstabile, solar selektive Beschichtungen für Solarabsorber“. (a) Mikrostruktur der entwickelten Beschichtungen und (b) deren Reflexion (rote Kurve) im Vergleich zu unbeschichtetem SiC (schwarz-gestrichelt) und dem Sonnenspektrum (gelb-gepunktet). Die erfolgreiche Beschichtung dreidimensionaler Strukturen gelang auf (c) SiC und erfolgt im weiteren Verlauf auf (d) selbstheilenden MAX-Phasen.

In der dritten Projektphase erfolgt die Applikation der entwickelten Beschichtungstechnologie auf neue selbstheilende Keramiken (sog. MAX-Phasen) und metallischen Superlegierungen. Die Keramiken werden dabei als periodisch-zellularen Strukturen mittels Building-Block-Technologie aufgebaut und ihre Anordnung hinsichtlich der thermo-mechanischen Eigenschaften hin optimiert.

Innerhalb der dritten Projektphasen konnten die MAX-Phasen erfolgreich synthetisiert und verarbeitet werden. Als Verbindungstechnologie der einzelnen Building-Blocks werden Metall-Keramik Verbunde genutzt deren Entwicklung andauert. Die Applikation der Beschichtungen auf hochtemperaturstabilen Superlegierungen erfolgte in Kooperation mit dem Teilprojekt „Zellulare Superlegierungen“ (TP2, Prof. Körner). Erste Ergebnisse zeigten, dass der erforderliche Temperaturschritt zur Carbidsynthese die Stabilität der Superlegierungen überschritt. Als Konsequenz daraus wurde eine Kooperation mit dem Bayerischen Laserzentrum und der Universität Bayreuth begonnen, um die Carbidsynthese von einem ofenbasierten zu einem substratschonenden laserbasierten Prozess zu überführen. Erste Ergebnisse zur Lasersinterung zirkonbasierter Komposite wurden unter Federführung des Bayerischen Laserzentrums veröffentlicht [Tangermann-Gerk et al., Mat. Des. 109 (2016)].

Zusätzlich zu den dargestellten Erfolgen in der Entwicklung von Receiverstrukturen und Beschichtungen konnten die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse, Materialien und Analysemethoden auf weitere Anwendungen übertragen werden. So wurde das entwickelte SiC-Substratmaterial hinsichtlich seiner Verwendbarkeit in hocheffizienten Wärmeüberträgern, sog. Loop-Heat-Pipes (LHPs), untersucht und dort erfolgreich eingesetzt. Die poröse Struktur wurde durch das Einbringen periodischer Porenkanäle verbessert und weist nun eine Kombination von exzellenter thermo-chemischer Beständigkeit und Durchströmbarkeit auf, was den Einsatz der LHPs in den solarthermischen Hochtemperaturanlagen ermöglicht. Die Ergebnisse zur Materialentwicklung und dem Einsatz in LHPs wurden erfolgreich publiziert [Weisenseel et al., Adv. Eng. Mat. (2016), in press].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Projektziel zum Einsatz funktioneller zellulärer Strukturen in der Energiegewinnung und insbesondere die Entwicklung neuartiger hochtemperaturstabiler Beschichtungen, für solarthermische Anwendungen, erfolgreich erreicht wurde. Die erzielten Ergebnisse besitzen das Potential für industrielle Produktionsprozesse und signifikante Effizienzsteigerungen solarthermischer Kraftwerke. Ebenso ist der Materialtransfer des Receivermaterials auf hocheffiziente Wärmeübertrager ein Erfolg, da so Energietransportverluste, z.B. bei der Wärmerückgewinnung in der Metall und Keramikindustrie, deutlich verringert werden können. Auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse wird die Forschung hinsichtlich der Beschichtung selbstheilender Keramiken (MAX-Phasen) und deren Anordnung in periodischen Strukturen, nach Abschluss des EnCN1 in anderen Projekten fortgeführt.

3 Konzeptstudie Hochtemperaturenergiespeicher

Im Rahmen der Adaptierung der Projektarbeit nach dem Wegfall des zentralen Industriepartners aus dem Bereich konzentrierte Solarthermie wurde auch eine Konzeptstudie zur Hochtemperaturenergiespeicherung durchgeführt. So sollte im Idealfall der Wegfall dieses Industriepartners mit inhaltlich kompatibler Ausrichtung kompensiert werden und neben der Energieerzeugung auch möglicherweise die Energiespeicherung im Projekt stärker thematisiert werden können. Die Entwicklung geeigneter Langzeitenergiespeicher ist unter den Gesichtspunkten der Energiewende von essentieller Bedeutung. Speicher tragen nicht nur zur Stabilisierung der Netze bei. Sie ermöglichen es, regenerativ erzeugte Energie aus Monaten mit geringem Bedarf aber hoher Produktion saisonal zu verschieben. Die saisonale Speicherung von elektrischer Energie erweist sich jedoch als äußerst schwierig. Aufgrund von Stabilitätsproblemen kann nicht beliebig viel Überschussstrom aus PV-Anlagen in das Netz eingespeist werden. Dies führt dazu, dass Anlagen abgeregelt werden, wodurch vorhandene Energie ungenutzt bleibt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, elektrischen Strom in andere Energieformen wie Wärme umzuwandeln und bspw. mit Hilfe reversibler Gas/Feststoff-Reaktionen unter großer Enthalpie- sowie Entropieänderung zu speichern. Der Vorteil von thermochemischen Energiespeichern (TCES) liegt in der relativ hohen Speicherdichte, die über der von sensiblen oder latenten Speichertechnologien liegt. Zudem kann Energie auf diese Weise über einen langen Zeitraum verlustfrei gespeichert werden.

In bisherigen Konzepten wurden lediglich Einzelhaushalte betrachtet. Zur Speicherbeladung wurde die Abwärme aus Solarkollektoren verwendet. Das Simulationsmodell dieser Studie ermöglicht die dynamische Betrachtung eines kompletten Ortsstrangs auf Basis viertelstündlicher Stromerzeuger-, sowie elektrischer und thermischer Lastgangdaten. Vorhandener Überschussstrom aus Photovoltaikanlagen dient der Beladung des Speichers mittels Erzeugung energiereicher Materials.

Die Auswahl der in dieser Arbeit näher untersuchten Reaktionssysteme erfolgte anhand definierter Anforderungen. Reaktionen mit Wasserdampf eignen sich für eine offene Betriebsweise, bei der die dampfförmige Komponente aus der Atmosphäre aufgenommen bzw. an diese abgegeben werden kann. Dadurch wird kein zusätzlicher Speichertank benötigt, sondern lediglich zwei Feststofftanks. Basierend auf diesen Erkenntnissen und unter Einbezug weiterer möglicher Verluste wurde eine effektive Speicherdichte unterschiedlicher Materialien berechnet. Dabei wurde besonders auf die bei der Langzeitspeicherung notwendige Verdampfung von Wasser eingegangen. Nur unter Vernachlässigung der Verdampfungs- und Aufheizvorgänge kann eine ähnlich hohe Speicherdichte erzielt werden verglichen mit veröffentlichten Literaturwerten. Je mehr Mol Wasser verdampft werden müssen, desto höher ist der Energieaufwand zur Bereitstellung von Wasserdampf bei Reaktionstemperatur. Eine hohe Reaktionsenthalpie lässt somit nicht automatisch auf ein geeignetes thermochemisches Materialsystem schließen. Außerdem ist eine

offene Prozessführung entgegen vieler Publikationen nicht automatisch die beste Variante hinsichtlich der erzielbaren System-speicherdichten. Es kann durchaus vorkommen, dass die notwendige Energie für die Verdampfung des Reaktionsgases den Energieaufwand zur Speicherung dieser Komponente in einem geschlossenen System übersteigt.

Aus diesem Grund wurden dynamische Simulationen vorgenommen, um das Systemverhalten von CaOH_2/CaO , MgOH_2/MgO und $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}/\text{MgSO}_4$ zu analysieren. Als wesentliche Größe wurde der Deckungsgrad definiert, der das Verhältnis aus thermischer Energie aus dem TCES zu gesamter thermischer Energie im Pufferspeicher bildet. Es wurden zwei Szenarien betrachtet. In einem Szenario war der thermische Bedarf deutlich höher als die überschüssige PV-Leistung. In diesem Fall macht ein TCES keinen Sinn. Im zweiten Szenario lag der vorhandene Stromüberschuss hingegen 50 % über dem thermischen Verbrauch. Bei vollständiger interner Wärmerückgewinnung konnte der Wärmebedarf in diesem Fall mittels TCES gedeckt werden. Allerdings kann in Realität nicht von einer vollständigen Wärmerückgewinnung ausgegangen werden. Im Modell existieren vier Wärmerückgewinnungsgrade (η_1 =Wärmerückgewinnung aus Wasserdampf, η_2 =Rückgewinnung der Kondensationswärme, η_3 =Wärmerückgewinnung aus energiereichem Material A, η_4 =Wärmerückgewinnung aus energiearmem Material AB). Eine Potentialanalyse der internen Wärmerückgewinnung zeigt, dass CaOH_2 nur bei Wirkungsgraden über 50 % einen höheren Deckungsgrad erreicht als die beiden anderen Systeme. Dies lässt sich anhand der hohen Reaktionstemperatur begründen. Je höher die Reaktionstemperatur des Systems ist, desto mehr Wärme kann bei der Entladung zurückgewonnen werden. Diese könnte auch direkt zum Heizen verwendet werden, da zeitgleich Wärmebedarf besteht. Je mehr Mol Wasser pro Mol Feststoff bei der Reaktion verdampft werden und bei Reaktionstemperatur bereitgestellt werden müssen, desto entscheidender ist der Wirkungsgrad des Kondensators. Mit einheitlichen Wirkungsgraden von 75 % könnte der Wärmebedarf des betrachteten Ortsstrangs im zweiten Szenario mittels TCES gedeckt werden. Allerdings gestaltet sich die Feststoff-Feststoff-Wärmeübertragung eher problematisch. Wird diese zu null gesetzt, reduziert sich der Deckungsgrad. Realistisch kann von einem Deckungsgrad von 75 % ausgegangen werden. Der Größenvergleich des TCES mit einem rein sensiblen Heißwasserspeicher zeigt, dass auf dem chemischen Weg Energie nicht nur länger, sondern auch in einem deutlich geringeren Volumen gespeichert werden kann. Das Volumen eines sensiblen Heißwasserspeicher müsste etwa 15 Mal größer sein verglichen mit einem TCES (zwei Materialspeichertanks für die Komponenten A und AB und ein Pufferspeicher) um mit einer maximalen Speichertemperatur von 95°C den thermischen Bedarf des Ortsstrangs zu decken. Die mittels dynamischer Simulation erzielte Speicherdichte von 1,69 GJ/m³ ist etwa viermal höher im Vergleich zum sensiblen Heißwasserspeicher. Die TCES Speicherdichte der Simulation beträgt 75 % der berechneten effektiven Speicherdichte ohne Berücksichtigung der Verdampfungsenthalpie und Aufheizevorgänge mit Bezugsvolumen AB (2,30 GJ/m³).

Im Modell wurde eine reine Enthalpiebetrachtung vorgenommen, um die Beziehungen möglichst einfach zu halten. Die getroffenen Annahmen müssen daher mittels detaillierter Analysen inklusive Wärmetauscher-Berechnungen überprüft werden. Nur dann kann eine realistische Aussage getroffen werden. Da die interne Wärmerückgewinnung das Gesamtergebnis sehr stark beeinflusst, sollte diese Untersuchung unbedingt vorgenommen werden. Leider können derzeit noch keine Aussagen über die Kosten des TCES getroffen werden. Ein wirtschaftlicher Vergleich der Systeme würde durchaus sinnvoll sein. Zudem müsste analysiert werden, ob ein Deckungsgrad von 75 % wirtschaftlich rentabel ist oder ob es sinnvoller wäre, zusätzliche PV-Leistung oder Windkraft zu installieren, um den Bedarf vollständig zu decken.

Die Simulationen haben gezeigt, dass es möglich ist, Überschussstrom thermochemisch zu speichern und saisonal verschoben in Form von Wärme bereitzustellen. Um die Ergebnisse unter den getroffenen Annahmen zu überprüfen, wäre der nächste sinnvolle Schritt, eine Versuchsanlage zu errichten. Da es eine Vielzahl weiterer Reaktionssysteme gibt und zudem jedes Material optimiert werden kann (z. B. durch Zugabe eines Katalysators, durch Integration des Materials in geeignete Trägerstrukturen oder durch Mischen verschiedener Energiespeichermaterialien), sollten Materialerprobungen durchgeführt werden. Die Reaktorgeometrie wurde im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt, spielt jedoch eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Wärmeein- und Ausbringung. Eine Optimierung könnte das Systemergebnis daher positiv beeinflussen. Prinzipiell könnte die gespeicherte Wärme mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auch wieder in Strom umgewandelt werden. Für den angestrebten Bau eines Demonstrators ist diese Betrachtung allerdings sekundär, da KWK technisch relativ ausgereift ist.

4 Grundlagenforschung an Thermoelektrika

Diamant ist ein Halbleiter, der über eine Reihe von extremen Eigenschaften verfügt, die ihn technologisch auf vielen Gebieten interessant machen. Durch seine große Härte und die hohe Temperaturbeständigkeit eignet er sich beispielsweise als Ausgangsmaterial für thermoelektrische Generatoren, die dazu dienen, thermische Energie direkt, das heißt ohne den Umweg über kinetische, in elektrische umzuwandeln. Für diese Anwendungen ist es jedoch notwendig, den Diamanten zu dotieren, ein Vorgang, der bis heute Schwierigkeiten bereitet. Zwar ist die p-Leitung, die über die Dotierung mit Bor erreicht wird, inzwischen ein gängiges technisches Verfahren. Die für die Thermoelektrik ebenfalls nötige n-Leitung, die die Reihenschaltung von thermoelektrischen Spannungsquellen und damit technisch sinnvoll nutzbare Leistungen ermöglicht, ist jedoch bis heute nicht endgültig gelöst. Im Rahmen von MATSOL wurde daher wichtige Grundlagenforschung zur n-Leitung in Diamant betrieben.

Stickstoff, der über einen ähnlichen Atomradius wie Kohlenstoff und im Vergleich mit diesem über ein zusätzliches Außenelektron verfügt, scheint aus eben diesen Gründen ein geeigneter Kandidat für die Dotierung zu sein. Sowohl bei praktischen Versuchen als auch bei theoretischen Berechnungen ergab sich jedoch ein Dotierniveau von 1,7 eV unterhalb der Leitungsbandkante. Damit wäre Stickstoff zwar theoretisch für die Dotierung geeignet, die Energiedifferenz aber für eine praktische Anwendung zu groß. Durch Forschung im Projekt MATSOL konnte mithilfe der Stickstoffdotierung von Mikrowellen-CVD-Diamantfolien nachgewiesen werden, dass ein erhöhter Stickstoffanteil zwar tatsächlich eine höhere Leitfähigkeit zur Folge hat, diese aber in erster Linie auf einen größeren sp^2 -Anteil (Graphit) in der Schicht zurückzuführen ist.

Damit ist die Suche nach einem alternativen Element unumgänglich. Im Rahmen von MATSOL wurden dabei Möglichkeiten erforscht, die die Übergangsmetalle der IV. und V. Nebengruppe bieten. Diese sind stabile Carbidbildner und damit prädestiniert für eine Verbindung mit Kohlenstoff. Um grundlegende Einsichten in die Wechselwirkung von Kohlenstoff und Metall zu erlangen, wurde am Energiecampus Nürnberg mit der *TINA 700* der Firma *Vakuumtechnik Dresden* eine PVD-Anlage betrieben, in der mittels Lichtbogenverdampfen und Sputtern in kohlenstoffreicher Atmosphäre Titancarbidsschichten synthetisiert wurden.

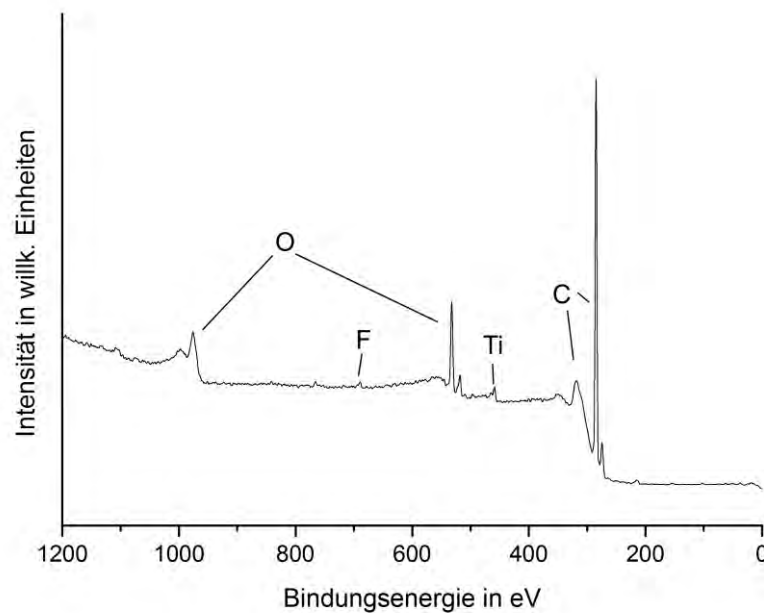


Abbildung 37: Nachweis der Einbringung von Titan in Diamant mithilfe von XPS.

Dabei wurden Parameter ermittelt, unter denen möglichst phasenreine Beschichtungen möglich sind, um so eine Grundlage für die mögliche Kombination von PVD zur Carbideinbringung und CVD zur Diamantbeschichtung zu erreichen. Der Vergleich mit pressgesinterten Proben zeigt eine gute Übereinstimmung der thermoelektrischen Kenngrößen.

Parallel dazu erfolgten Versuche, mittels Mikrowellenplasma- oder Heißdraht-CVD Diamantschichten zu synthetisieren und gleichzeitig Fremdatome einzubringen, um so leitfähiges Material zu erzeugen. Die ersten erfolgreichen MWCVD-Versuche sind jedoch nicht auf Dotierung, sondern auf eine vielversprechende Mischung aus sp^2 - und sp^3 -hybridisiertem Kohlenstoff zurückzuführen. Die entsprechenden Proben, die dank eines sehr hohen Diamantanteils ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen wie nichtleitfähiger Diamant, haben im Vergleich zu letzteren eine um bis zu sechs Größenordnungen gesteigerte elektrische Leitfähigkeit. Sie sind damit technologisch in vielen Bereichen, in denen elektrisch leitfähiger Diamant von Interesse ist, anwendbar. In Bezug auf die Thermoelektrik ist jedoch ihr positiver Seebeck-Koeffizient von Nachteil.

In heißdrahtaktivierten CVD-Versuchen ist es nun erstmals gelungen, Titan nachweisbar in Diamant einzubauen. Dieses Ergebnis in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. Zum ersten kann durch gezielte Prozessführung sowohl der Titananteil in der Probe als auch die Art und Weise des Einbaus verbessert werden. Haben die Proben zurzeit noch einen vergleichsweise hohen Sauerstoffanteil, der in Verbindung mit Titan eher leitfähigkeitsmindernd wirkt, ist davon auszugehen, dass in naher Zukunft Diamantschichten, die fast ausschließlich Titan als Fremdatome aufweisen, möglich sind. Zum zweiten ist das für die entsprechenden Versuche entwickelte Verfahren, Tetraisopropylorthotitanat als Präkursor zu verwenden, universell für alle Übergangsmetalle der IV. bis VI. Nebengruppe einsetzbar. Für alle diese Elemente existieren ähnlich zu handhabende metallorganische Präkursoren, die mit Ethanol, Isopropanol o. ä., das als Kohlenstoffquelle dient, zu Diamantschichten synthetisiert werden können. Damit ist die Möglichkeit eröffnet, systematisch die Möglichkeiten der Diamantdotierung mithilfe von Übergangsmetallen zu studieren und so der Energienutzbarmachung aus Abwärme durch Thermoelektrik näher zu kommen.

Um diese Möglichkeit und die mit ihr verbundenen Vorteile für die Energiewende bekannt zu machen, wurden auf der Basis von poly- und nanokristallinem Diamant und Konstantan (als n-Leiter) Demonstratoren gebaut. Dabei wird die Wärmeeinkopplung unter anderem mithilfe eines Hochleistungsabsorbers aus Nickelbasissuperlegierung erreicht, der durch selektives Elektronenstrahlschmelzen gebaut wurde. Mit den Demonstratoren konnte sowohl auf wissenschaftlichen Tagungen als auch auf Veranstaltungen, die sich eine breite Öffentlichkeit richteten, eindrucksvoll gezeigt werden, dass die direkte Umwandlung von thermischer in elektrische Energie ein Baustein sein kann, um die Energieprobleme der Gegenwart und Zukunft zu lösen.



Abbildung 38: Thermoelektrischer Demonstrationsgenerator.

5 Entwicklung von Hochtemperatur-stabilen Phosphoren zur genauen, orts aufgelösten Temperaturbestimmung

Das Teilprojekt beschäftigt sich mit der Optimierung von Leuchtstoffen (Phosphore), die zur genaueren Bestimmung von Oberflächentemperaturen bei Hochtemperaturprozessen eingesetzt werden können. Diese Phosphore können dann beispielsweise bei den MATSOL-Solarreceivern-Strukturen eingesetzt werden, um lokal die Temperaturen kontaktlos messen zu können. Dies ist mit Infrarotthermografie nicht möglich, da einerseits der Emissionsgrad der zu untersuchenden Struktur sich oftmals durch Oxidation verändert. Andererseits ist es auch nicht möglich, da extremes Streulicht, das hochkonzentrierte Sonnenlicht, eine kontaktlose Bestimmung der Temperatur per Infrarotstrahlung extrem verfälscht. Phosphorthermometrie bietet die Möglichkeit, über Temperatur-abhängige Lumineszenzstrahlung diese Problematik zu umgehen.

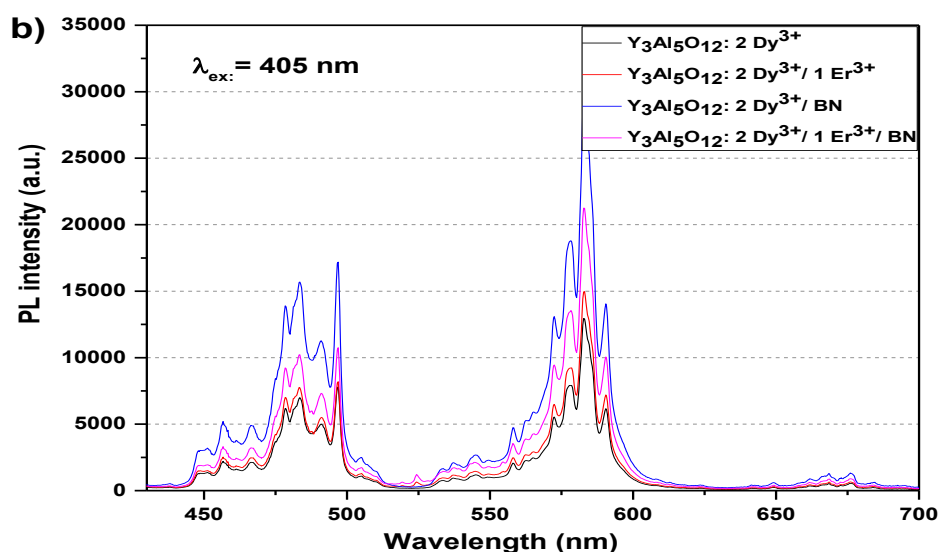


Abbildung 39: Emissionsspektren von 2% Dy³⁺; 2% Dy³⁺, 1% Er³⁺ und BN - legierten VAG mit 2% Dy³⁺; 2% Dy³⁺, 1% Er³⁺, aufgenommen bei 1023 K.

Im Rahmen des Projektes wurde ein automatisierter Messplatz zur Charakterisierung der Leuchtstoffe aufgebaut. Somit konnten verschiedenste Phosphore auf ihre Tauglichkeit zur Temperaturbestimmung getestet werden. Unter anderem wurden YAG:Dy und YAG:Sm als sehr vielversprechende Leuchtstoffe identifiziert, die mit einem konventionellen, günstigen Laser (405 nm, sichtbares blaues Licht) angeregt werden können. Zudem wurde ein Messverfahren für die Phosphorthermometrie entwickelt, die das Umgebungsrauschen (das konzentrierte Sonnenlicht) aus dem Messsignal zu filtern. Dazu wurde ein Zweikanal-Lock-In Verstärker angeschafft, bei dem beide Kanäle mit dem Anregungslaser gelockt sind. Die beiden Kanäle sind durch entsprechende optische Filter nur in zwei temperatur-abgängigen Emissionsbanden des Phosphors empfindlich. Somit konnte erfolgreich starke Hintergrundstrahlung (Rausch zu Signal Verhältnisse größer als 2000) herausgefiltert werden und damit sicher auf die richtige Oberflächentemperatur der Testprobe geschlossen werden. Schließlich wurde an erfolgreich an einer einfachen Methode gearbeitet, mit der bildgebend die Oberflächentemperatur bis 200 Grad gemessen werden kann. Im Vergleich zu den bisherigen Methoden hat die Messmethodik (basierend auf einer einzelnen, einfachen CMOS Kamera) den Vorteil von bedeutend günstigeren Anschaffungskosten.

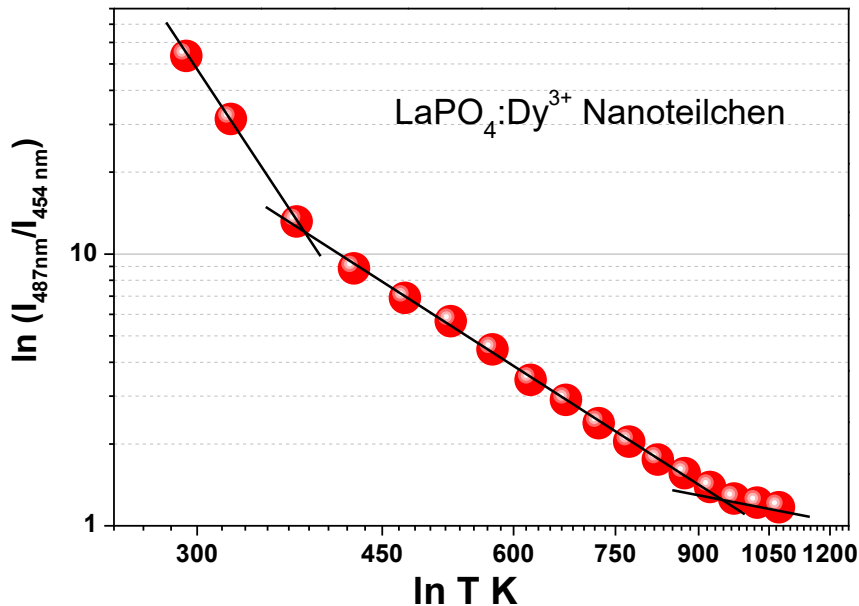


Abbildung 40: Verhältnis der PL- Intensitäten von zwei Linien des Dy³⁺ - Ions in LaPO₄ als Mittel zum Bestimmen der Temperatur.

Neben der Messtechnik-Entwicklung war eine weitere Aufgabe die Optimierung der bisherigen Leuchtstoffe, um das Signal zu verstärken und somit auch die Messgenauigkeit und die erfolgreiche Anwendung auch bei extremen (optischen) Umgebungsrauschen. Ziel der Arbeit war es daher vor allem, die Leuchtintensität der Phosphore zu verbessern. Um das zu erreichen, wurde Bor-Nitrid (BN) den bisherigen Kandidaten, YAG:Dy und YAG:Dy:Er hinzugegeben. Mit der Zugabe von BN wurden Teile der YAG Matrix ersetzt. Bei der Zugabe von wenig BN (6%) änderte sich die Kristallstruktur nicht, was durch Röntgendiffraktometrie bestätigt wurde. Die Hochtemperaturstabilität ist damit weiterhin gegeben. Die Zugabe von BN hatte auf die Leuchtintensität bei beiden Kandidaten sehr positive Auswirkungen. Bei YAG:Dy erhöhte sich die Lumineszenz um mehr als 130%, bei YAG:Dy:Er um 50% (s. Abbildung 39). Die Optimierung war somit sehr erfolgreich und eine verbesserte Temperaturbestimmung der Oberflächen mit den neuen Leuchtstoffen ist möglich.

Darüber hinaus wurde kolloidale Nanopartikel LaPO₄:Dy entwickelt, die als druckbares Material für die Lumineszenz-Thermometrie benutzt werden kann. Anwendung von kolloidalen Lösungen von Nanokristallen erlaubt Beschichtung von Oberflächen mit einer beliebigen Geometrie.

Das Material zeigt extrem hohe Empfindlichkeit im Niedrigtemperatur- Bereich, die auch für die Thermometrie sogar an Solarzellen und anderen Bauelementen benutzt werden kann (s.Abbildung 40). Für den „Niedrigtemperaturbereich“ (bis 600 K) wurden Mischungen von Leuchtstoffen entwickelt, die erlauben sogar durch eine visuelle Beobachtung die Temperaturen zu bestimmen (s. Abbildung 41).

Innerhalb des Projektes wurden erfolgreich Messtechnik und Leuchtstoffe weiter entwickelt, so dass Phosphorthermometrie mit günstigerer Technik angewandt werden kann sowie auch unter starkem Umgebungsrauschen eingesetzt werden kann.

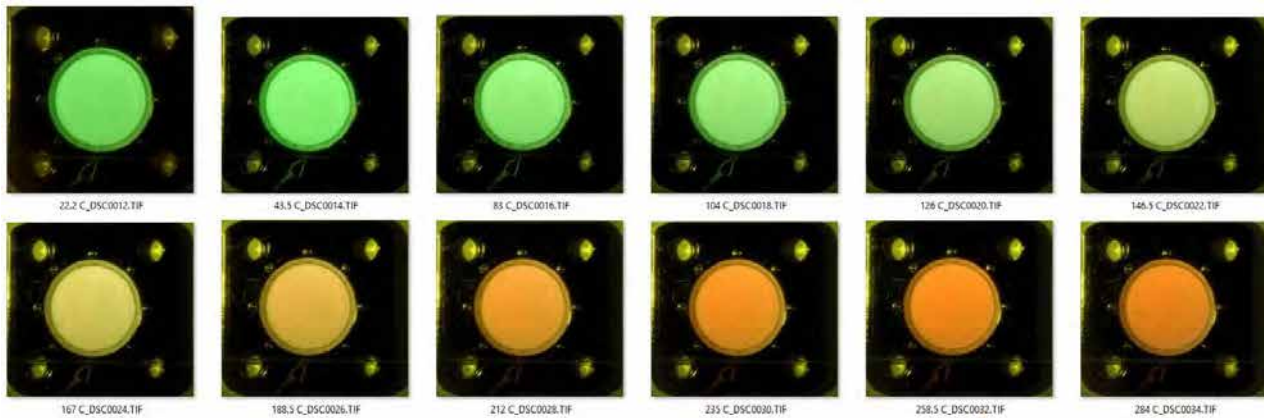


Abbildung 41: Lumineszenz-Farbe der Mischung von $Sr_{0,98}Al_2O_4:2\%Eu^{2+}$ und $Mg_{14}Ge_5O_{24}:5\%Mn^{4+}$ Leuchtstoffen angeregt mit einer 365 nm - LED. Die Temperatur wurde zwischen 22 °C (links oben) und 284 °C (rechts unten) geändert.

6 Intelligente Gläser für Erneuerbare Energieerzeugung: Laser induzierte Glastexturierung

Gegenwärtig sind verschiedenartige Wege als Konzept angedacht, die Effizienz von Licht-empfangenden und Licht-sendenden Bauteilen, wie LEDs (light emitting diodes) und Solarzellen, zu verbessern. Es ist mit geeigneter Texturierung von Beschichtungen oder Glassubstraten möglich, die Gesamteffizienz der Bauteile zu erhöhen durch bessere Anti-Reflexions-Eigenschaften mittels optimierter Lichtein- bzw. -auskopplung. Beispielsweise kann die Effizienz von Solarzellen um 2-4% erhöht werden, wenn kommerziell erhältliches Saint-Gobain „Albarino“ Glas verwendet wird statt unstrukturiertes (ebenes) Standard-Glas.

Verschiedene Techniken zur Strukturierung von Glas sind verfügbar. Die Verwendung eines CO₂ Lasers ist eine sehr vielversprechende Möglichkeit zur Oberflächenstrukturierung von Glas mittels eines Lasers: CO₂ Laser besitzen eine ausgereifte Technik, werden schon erfolgreich in der Industrie angewandt und die ihre Strahlung (10,6 µm) wird stark vom Glas absorbiert. Aufgrund der recht hohen Wellenlänge ergibt sich aber leider das Problem, dass kleine Strukturen, die zur Anwendung im sichtbaren Bereich gedacht sind (wie LEDs und Solarzellen) nicht erzeugt werden können (Beugungslimitierung).

Ein Ausweg aus dieser Problematik ist „Laser Induced Periodic Surface Structures“ (LIPPS). Mit dieser Technik werden Wellenmuster in der Größenordnung Mikrometer erreicht. Dies erfolgt durch Interferenz des gebeugten und gebrochenen Laserstrahls. Wir testeten diese Methode an Standard-Borosilikatglas. Wir konnten erfolgreich unterschiedliche Strukturbreiten auf die Glasoberfläche induzieren (Abbildung 42a, Abbildung 42b). Entsprechend der Oberflächenstrukturierung zeigten die Proben auch Beugungsmuster im sichtbaren Bereich was somit den prinzipiellen Nutzen von LIPPS zur Effizienzsteigerung von LEDs und Solarzellen zeigt. Abbildung 42c zeigt ein typisches Oberflächenprofil das bei unseren Versuchen erzeugt wurde.

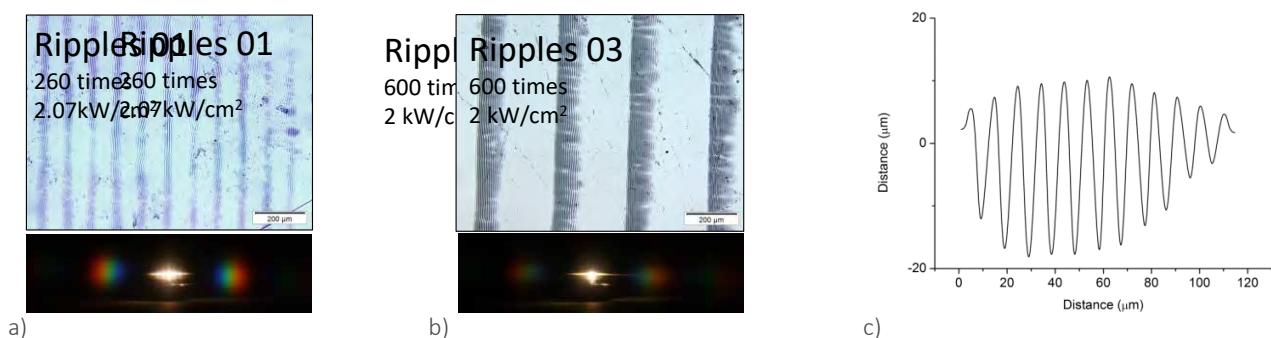


Abbildung 42: Mikroskopie Aufnahmen der CO₂ Laser-strukturierten Gläser (LIPPS). Oberflächenaufnahme von zwei verschiedenen Proben (a, b - oben). Beide Proben zeigen Beugungseffekte im Licht (a, b - unten). Abbildung c zeigt ein typisches Oberflächenprofil der Proben erzeugt mit LIPPS.

Als nächstes verglichen wir die optischen Eigenschaften von Standard-Glas mit unserem optimierten Glas. Für unstrukturiertes Glas zeigt sich Totalreflexion ab relativ niedrigen Winkeln wodurch die Transmission sehr schnell und stark bis auf null abfällt (s. Abbildung 43).

Totalreflexion kann durch die Strukturierung extrem unterdrückt werden bis hin zu Winkel von 70°. Das Muster „Ripple 03“ zeigte noch eine Transmission von 10% bei 55° und 5% bei 70°. Das ist ein beträchtlicher Gewinn im Vergleich zu Standard-Glas

und zeigt das Potential zur Verbesserung der Gesamteffizienz von LEDs und Solarzellen mit Hilfe der LIPPS Technik. Diese Technik kann zudem neben Glas auch zur Anwendung auf anderen Materialien genutzt werden: Halbleitermaterialien wie Silizium oder Germanium, Metalle, ebenfalls elementare Bestandteile von LEDs und Solarzellen.

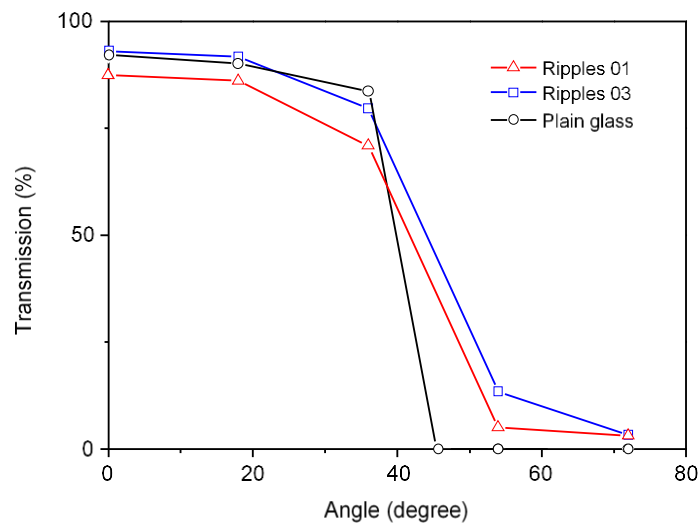


Abbildung 43: Transmission der Gläser gemessen in Abhängigkeit des Einfallswinkels für eine Standard-Probe sowie zwei strukturierte Proben (LIPPS). Die Daten wurden bei 450 nm gemessen.

Ein weiterer Weg um die Effizienz von Solarzellen zu optimieren ist den Versatz des Sonnenspektrums und der spektralen Empfindlichkeit zu verkleinern. Dies kann durch „down-shifting“ oder „up-conversion“ erfolgen. Üblicherweise werden Seltene Erden als Dotierungsmaterial für diesen Zweck verwendet. Leider kommen Seltene Erden, wie Name schon sagt, selten in der Umwelt vor und sind daher teuer. Eine Alternative stellen leichter verfügbare d- oder p-Typ Metalle dar, die als Co-Dotierungsmaterial in optischen Konverterschichten eingesetzt werden können.

Silikat Bi-dotierte Gläser wurden daher als mögliche down-Converter für Silizium PV Zellen betrachtet. Abbildung 44a zeigt die breite Emission im Nahinfrarot von Bismut in Aluminiumsilikat-Glas unter UV-Beleuchtung. Im Gegensatz zu den Selten-Erden-dotierten Gläsern kann die Lumineszenzbande von Bi-dotierten Material signifikant verschoben werden, was eine Optimierung des Emissions-Spektrums passend zum Absorptionsspektrum der entsprechenden Solarzelle erlaubt.

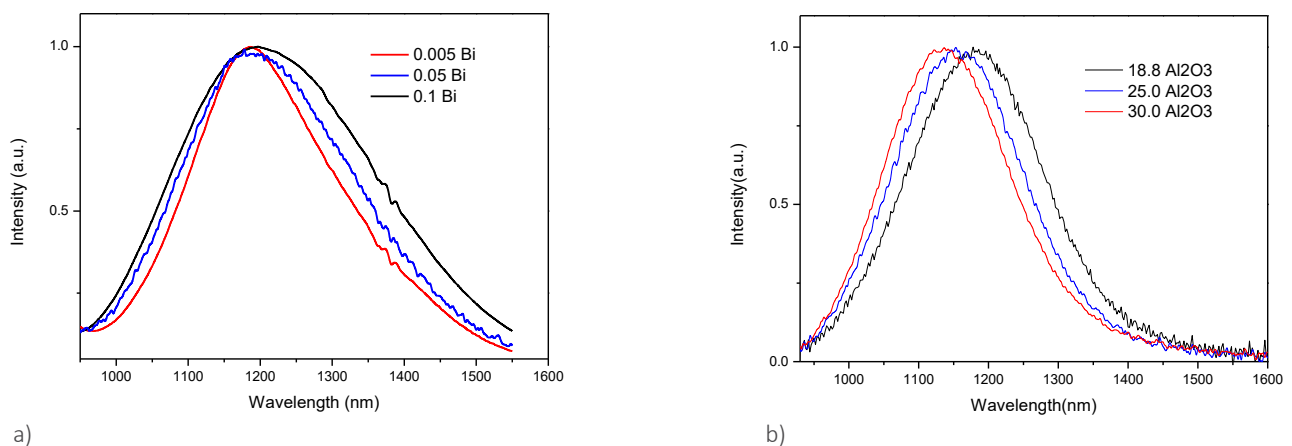


Abbildung 44: Nahinfrarot Lumineszenzspektrum für: a) $x\text{Bi}_2\text{O}_3-5.5\text{Al}_2\text{O}_3-94.5\text{SiO}_2$ ($x=0.005; 0.05; 0.1$) Glas bei 370 nm Anregung; b) $0.2\text{Bi}_2\text{O}_3-(50-x)\text{CaO}-x\text{Al}_2\text{O}_3-50\text{SiO}_2$ ($x=18.8; 25; 30$) Glas unter Anregung bei 500 nm.

Da die Lumineszenz von Bismut einem intraconfigurationalen Übergangs der externen Elektronenschale ($6p^2$ für Bi^{+} Ionen) zugewiesen wird, hängt die Lumineszenz stark von der lokalen Umgebung des optischen Zentrums ab. Durch Änderung des Al-Gehaltes innerhalb eines $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Glases wird das Bi-Lumineszenzband von 1130 nm verschoben auf 1190 nm (s. Abbildung 44b). Eine noch stärkere Verschiebung kann durch Austausch des Glas-Systems erreicht werden, so dass der spektrale Bereich von 1000 bis 1600 nm abgedeckt wird. Diese einzigartigen optischen Eigenschaften ermöglichen neue günstige Materialsysteme zur Anwendung in der Energiewandlung basierend auf Bi-dotierten Gläsern.

7 Thermomechanische Modellierung und Simulation von Fugestellen

In diesem Projekt wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, um am Computer die mechanischen Belastungen an Fugestellen (Übergang zwischen zwei Bauteilen) zu simulieren. Die Software steht seit Ende 2015 (planmäßiges Projektende) zur Verfügung. Ein Beispiel für die Relevanz unserer wissenschaftlichen Arbeit sind evakuierte Röhrenkollektoren für Konzentrierte Solarthermie, bei denen die Sonnenenergie in thermische Energie umgewandelt wird. Die Auslegung solcher Bauteile benötigt umfassendere Thermomechanische Modelle um dann realitätsnahe Computersimulationen durchführen zu können. Röhrenkollektoren bestehen aus einer Absorberplatte, die die Sonnenenergie aufnimmt, einer Hochtemperaturmetallröhre, die von der Absorberplatte erhitzt wird und einem Arbeitsfluid, das in der Kollektorröhre die thermische Energie transferiert. All diese Bauteile sind in einer evakuierten Glas-Röhre eingehaust. Die Verbindung der Glasröhre mit der Metallröhre stellt eine Grenzfläche dar, die starker zyklischer thermo-mechanischer Belastung unterzogen ist. Die Belastung kann ein Versagen der Verbindung hervorrufen und einen Verlust des Vakuums, der wiederum drastisch die Funktionalität des Röhrenkollektors senkt. Die folgenden numerischen Studien wurden durchgeführt, um solche Probleme zu untersuchen.

In Kooperation mit WW6 wurde ein vollständiges, nicht-lineares thermo-mechanisches Finite Element Software Packet implementiert. Im speziellen wurde eine thermodynamisch konsistente Grenzflächen-Elastizitätstheorie entwickelt. Die Theorie umfasst auch die Berücksichtigung von Schadensmechanismen, die dann zu einem Bauteilversagen führen können. Weiterhin wurde ein thermodynamisch konsistentes Grenzflächen-Modell erarbeitet, das die Grenzflächen-Inelastizität mit dem Kohäsions-Zonen Model (cohesion zone model, CZM) koppelt. Die mid-plane Materialdegradation der Grenzfläche wird dabei als ein nicht-lokales Schädigungsmodell (integralen Typs) abgebildet. Die off-plane Dekohäsion wird durch ein klassisches CZM beschrieben. Die beiden Modelle werden dann über die entsprechenden Materialschädigungs-Variablen gekoppelt.

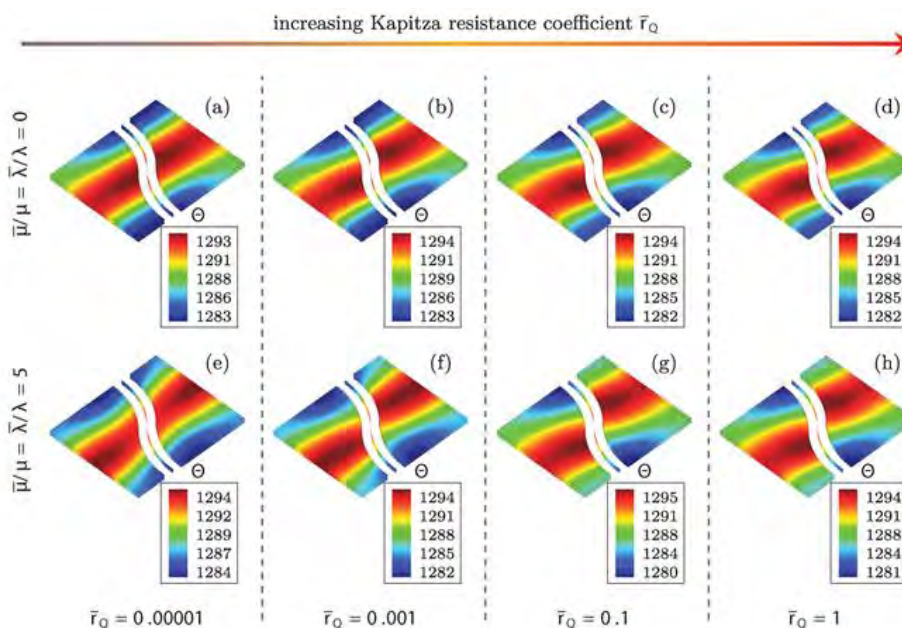


Abbildung 45: Temperaturverteilung eines Bauteils bei einer Deformation von 100% für nicht-energetische (a-d) und energetische (e-f) Kohäsions-Grenzflächen. Der thermische Widerstand r_Q wächst dabei von links nach rechts.

Ein neues Grenzflächenmodell, das die klassische Formulierung der Kohäsions-Zone mit der elastischen Grenzflächentheorie koppelt unter Kapitza-Bedingungen innerhalb eines thermo-mechanischen Bezugssystems wurde zuletzt von uns vorgeschlagen. Solch ein Grenzflächenmodell erlaubt die Simulation von Modellen mit Diskontinuitäten in Geometrie, Temperatur und Normalspannung. Noch nicht möglich ist die Einbindung von Sprüngen des Wärmeflusses in Richtung der Normalen entlang der Grenzfläche.

Innerhalb des Projektes haben wir erfolgreich ein Finite-Element Packet erarbeitet, mit dem detailliert eine große Spanne von verschiedenen thermomechanischen Problemen simuliert werden kann. Mittlerweile umfasst das Packet auch die Simulation von in-elastischen Verhalten des Materials in Bezug auf Schädigung. Drei Beiträge für wissenschaftliche Journale wurden vorbereitet, bei zwei Konferenzvorträgen wurden die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse präsentiert und Drittmittelprojekte wurden akquiriert. Als konsequente Weiterentwicklung des Software-Packets werden wir die Simulationen und die numerischen Ergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen aus den Versuchen der Projektpartner verifizieren. Zudem werden wir an einem noch allgemeineren Grenzflächenmodell arbeiten, bei dem bisher einschränkende Annahmen ersetzt werden.

8 Optisch induzierte Schnellalterung „High-C ALT“

Ein Kernpunkt beim Aufbau des MATSOL-Labors war die Realisierung eines Schnellalterungsprüfstandes zur Untersuchung von Solarreceiver-Strukturen. Dabei wird mit hochkonzentriertem Xenon-Licht eine Probe innerhalb von Sekunden extrem erhitzt, und danach wieder aus dem Lichtstrahl gefahren, so dass sich die Probe schnell wieder abkühlt. Temperaturrampen von einigen 10 Grad pro Sekunde sind damit realisierbar und durch diese extremen Temperaturrampen kann die Struktur beschleunigt auf ihre thermische Zyklenstabilität getestet werden. Nach der erfolgreichen Implementierung dieses optischen Schnellalterungsstandes mit einer Lichtleistung von 700 Sonnen (auf 2,5 cm x 2,5 cm) wurde das MATSOL-Prüflabor strategisch erweitert, um auch andere Materialien, vor allem im Bereich funktionale Beschichtungen, zu untersuchen. Neben der dazugehörigen Kühlung, um beispielsweise Solarzellen bei Bestrahlung und konstanter Temperatur zu vermessen, wurde auch der Lichtleistung-Bereich erweitert. Nun stehen am EnCN insgesamt drei Messstände zur Verfügung, mit denen Materialien sowohl auf Hochtemperatur-Zyklenstabilität, als auch auf Lichtehtigkeit geprüft werden können (Abbildung 46, links). Die Lichtintensität kann dabei extrem variiert werden (zwischen 1 und 700 Sonnen) bei zeitgleicher Temperaturmessung und –kontrolle (durch Hochleistungskühler).

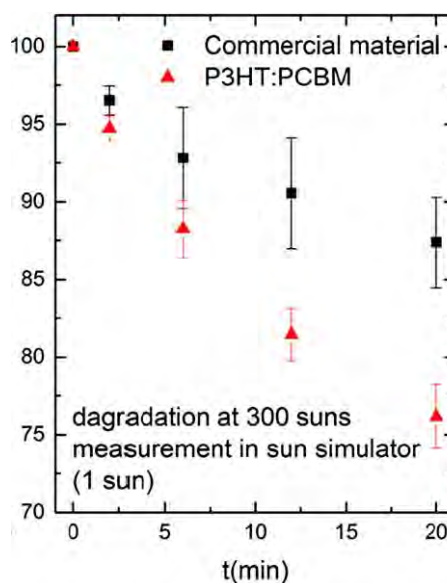
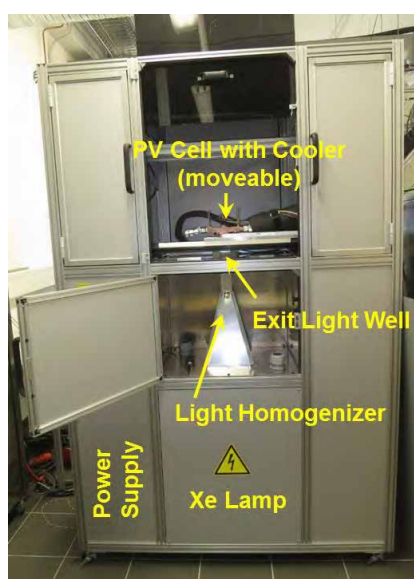


Abbildung 46: Links: Von uns entwickelter High-C-ALT Prüfstand mit bis zu 700 Sonnen Beleuchtungsstärke. Rechts: Vergleichsmessung am Prüfstand von zwei verschiedenartigen Solarzellen zum ultra-schnellen Testen der inhärenten Lebenszeit.

Erste Ergebnisse an organischen Solarzellen (OPV) zeigen deutlich die Vorteile und das Potential der Methodik. Die Messungen wurden an typischen OPV Solarzellen (P3HT:PCBM) durchgeführt über deren Alterung und Degradationsmechanismen ausreichend Erfahrungen vorhanden sind. Die Degradation, beispielsweise quantifiziert mit dem Kurzschlussstrom (J_{sc}), folgt einem typischen Verlauf, so wie er auch bei gängigen Degradationsstudien bei 1 Sonne zu finden ist. Dieses und weitere bisherige Ergebnisse bei unseren „high-C ALT“ Messungen untermauern das Potential der Methodik. Ziel ist es, verlässliche Abschätzungen der Lebensdauer verschiedener Materialien, vor allem Dünnschicht-Solarzellen, innerhalb kürzester Messzeit zu erhalten. Um das Potential der Methodik unter Beweis zu stellen wurde ein Vergleichstest von zwei gut bekannten Solarzellenmaterialien durchgeführt. Nach nur einer halben Stunde Messzeit (pro Probe) kann auf die Lebensdauer abgeschätzt werden. Bei dem Test zeigte sich, dass das hocheffiziente Material bedeutend schneller degradiert, was zu Literaturwerten bei Standard-Alterungsbedingungen passt. Diese Standardmessungen erstrecken sich aber über Wochen. Mit dem Messstand konnte erfolgreich eine Studie von zwei verschiedenartigen Solarzelltypen durchgeführt werden, bei den innerhalb von nur 20 Minuten eindeutig die Lebenszeitunterschiede der zwei Typen deutlich werden (Abbildung 46, rechts). Um eine Korrelation mit „normalen“ Beleuchtungsstärken zu ermöglichen wurden zwei weitere Teststände angeschafft, mit denen Proben unter Bestrahlungsstärken von 1 bis 150 Sonnen realisiert werden können. Detailliertere Forschung wird mit den Prüfständen innerhalb eines erfolgreich eingeworbenen DFG Projektes durchgeführt werden.

Die von uns entwickelte Methodik ist von größtem Wert für Materialwissenschaftler, da gegenwärtig sehr viele innovative und hoch-effiziente Materialien gefunden werden, über deren Langzeitstabilität allerdings bisher so gut wie keine Daten vorhanden sind. Langzeitstabilität ist allerdings ein elementarer Faktor für eine erfolgreiche Kommerzialisierung von Solarzellen basierend auf innovativen neuen Materialien. Schließlich kann die Methodik auch auf andere Materialklassen übertragen werden, beispielsweise könnte die Lichtehtigkeit von Verkapselungsmaterialien in kurzer Zeit getestet werden.

9 Schlussworte

Das Projekt MATSOL hat den Wegfall eines zentralen kommerziellen Partners am Anfang des Projektes erfolgreich abgefangen. Durch die Adaptierung der Forschungsthemen und die Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse steht nun eine breitere Expertise zur Verfügung als ursprünglich geplant. Einerseits stehen nun Methoden zur Verfügung aus dem Bereich konzentrierte Solarthermie, die in Zukunft für die Verbesserung solcher Anlagentechnik sorgen können. Zumindest außerhalb Deutschlands gibt es positive Signale, die eine stärkere kommerzielle Nutzung der Solarthermischen Energiewandlung erhoffen lassen. Ein größerer Impuls dabei war die Fertigstellung des größten Solarthermischen Kraftwerks der Welt (392 MW, Ivanpah Solar Power Facility, USA) im Jahr 2015. Zudem kann die im Projekt gewonnene Expertise auch auf zukünftige thermochemische-Hochtemperaturenergiespeicher übertragen werden, die vor ähnlichen Herausforderungen stehen werden (z. B. thermische Zyklenstabilität, optimierte und langlebige funktionale Beschichtungen oder auch Hochtemperaturmess- und Prüftechnik). Schließlich führte die erfolgreiche Forschungsarbeit zu erfreulichen Ergebnissen und vielen Publikationen auf (inter-)nationalen Konferenzen und angesehenen Fachzeitschriften.

10 Veröffentlichungen

- [1] A. Esmaili, A. Javili, P. Steinmann: Thermomechanical coupling of geometrically non-coherent interfaces, *PAMM*, 14, 455, 2014
- [2] A. Hashemi, A. Vetter, G. Jovicic, M. Batentschuk, C. J. Brabec: Temperature measurements using YAG:Dy and YAG:Sm under diode laser excitation (405 nm). *Measurement Science & Technology*, 26, 2015
- [3] K. Burlafinger, A. Vetter, C. J. Brabec: Maximizing concentrated solar power (CSP) plant overall efficiencies by using spectral selective absorbers at optimal operation temperatures. *Solar Energy*, 120, 2015
- [4] C. s. O. Ramirez Quiroz, I. Levchuk, C. Bronnbauer, M. Salvador, K. Forberich, T. Heumüller, Y. Hou, P. Schweizer, E. Spiecker and C. J. Brabec: Pushing efficiency limits for semitransparent perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 2015
- [5] I. Levchuk, C. Würth, F. Krause, A. Osvet, M. Batentschuk, U. Resch-Genger, C. Kolbeck, P. Herre, H.P. Steinrück, W. Peukert and C. J. Brabec: Industrially scalable, cost-effective and highly luminescent Mn^{2+} doped $Zn_xCd_{1-x}S/ZnS$ nanocrystals as efficient down-shifting material in photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 2016
- [6] L. M. Chepyga, G. Jovicic, A. Vetter, C. J. Brabec, M. Batentschuk: Photoluminescence properties of YAG:Dy, YAG:Dy:Er doped with BN thermographic phosphors, *Applied Physics B*, 2016
- [7] A. Haase, A. Peters, S.M. Rosiwal: Growth and thermoelectric properties of nitrogen-doped diamond/graphite. *Diamond and Related Materials*, Preprint, <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2015.10.023>
- [8] M. Engenhorst, J. Fecher, C. Notthoff, G. Schierning, R. Schmechel, S.M. Rosiwal: Thermoelectric transport properties of boron-doped nanocrystalline diamond foils, *Carbon* (81), 2015, 650-662
- [9] J. Fecher, M. Wormser, S.M. Rosiwal: Long term oxidation behavior of micro- and nano-crystalline CVD diamond foils, Preprint 10.1016/j.diamond.2015.11.009
- [10] B. Weisenseel; B. Zierath; T. Fey; P. Greil: Adjustment of the Optical Properties of Dispersion Derived Carbon Nanotube Coatings. *Advanced Engineering Materials*, 2015, DOI: 10.1002/adem.201500343
- [11] A. Esmaili; A. Javili; P. Steinmann. Coherent energetic interfaces accounting for in-plane degradation, *International Journal of Fracture*, 2016.
- [12] A. Esmaili; A. Javili; P. Steinmann: Non-coherent energetic interfaces accounting for degradation, *Computational Mechanics*, 2016
- [13] A. Esmaili; A. Javili; P. Steinmann: A thermo-mechanical cohesive zone model accounting for mechanically energetic Kapitza interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, 2016.
- [14] A. Esmaili; A. Javili; P. Steinmann: Highly-conductive energetic interfaces subject to in-plane degradation, *Mathematics and Mechanics of Solids*, 1-20, 2016.
- [15] A. Vetter, J. Hepp, C. J. Brabec: Automatized segmentation of photovoltaic modules in IR-images with extreme noise, *Infrared Physics & Technology*, 2016
- [16] A. Vetter, F. S. Babbe, B. Hofbeck, P. Kubis, M. Richter, S. J. Heise, J. Ohland, C. J. Brabec: Visualizing the performance loss of solar cells by IR-thermography - an evaluation study on CIGS with artificially induced defects, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016
- [17] J. Hepp, F. Machui, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, A. Vetter: Automatized analysis of IR-images of photovoltaic modules and its use for quality control of solar cells, *Energy Science & Engineering*, 2016
- [18] A. Vetter, K. Burlafinger, C.J. Brabec: Ultrafast screening method for assessing the photo-stability of thin film solar cells, *Electrical Engineering*, 2016

- [19] A. Hashemi, G. Jovicic, M. Batentschuk, C. J. Brabec, A. Vetter: Contactless Temperature Determination Using Dual-Channel Lock-in Phosphor Thermometry, *Measurement Science & Technology*
- [20] M. Ramsperger, C. Körner: Selective electron beam melting of the single crystalline nickel-base superalloy CMSX-4, *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Conference Proceedings*, 3/2016
- [21] L. Adler, F. Warmuth, M. Lodes, F. Osmanlic, C. Körner: The effect of a negative Poisson's ratio on thermal stresses in cellular metallic structures, *Smart Materials and Structures*, 25, 10/2016
- [22] F. Warmuth, F. Osmanlic, L. Adler, M. Lodes, C. Körner: Fabrication and characterization of a fully auxetic 3D lattice structure via SEBM, *Smart Materials and Structures*, under revision
- [23] B. Weisenseel, B. Zierath, T. Fey, P. Greil: Adjustment of the optical properties of dispersion derived carbon nanotube coatings, *Advanced Engineering Materials*, 18, 624, 2016
- [24] B. Weisenseel, J. Harris, M. Stumpf, S.E. Wolf, T. Fey, P. Greil: Enhancement of the carbothermal reduction of hafnium oxide by silicon, *Advanced Engineering Materials*, N.A., 2016
- [25] B. Weisenseel, P. Greil, T. Fey: Biomorphous Silicon Carbide as Novel Loop Heat Pipe Wicks, *Advanced Engineering Materials*, 2016
- [26] K. Tangermann-Gerk, G. Barroso, B. Weisenseel, P. Greil, T. Fey, M. Schmidt, G. Motz: Laser pyrolysis of an organosilazane-based glass/ZrO₂ composite system, *Materials & Design*, 109, 644, 2016

TRANSPORT

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Department Chemie- und Bioingenieurwesen (CBI) Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) Erlangen Catalysis Resource Center (ECRC)	TP 1: Energiespeicherung via Wasserstoff in den Wasserstoff-Trägermolekülen (Prof. Dr. Wolfgang Arlt/FAU-TVT) TP 2: Energietransport aus der Wüste nach Europa (Prof. Dr. Wolfgang Arlt/FAU-TVT) TP 3: Reaktionstechnik mit molekularen Wasserstoffspeichersystemen (Prof. Dr. Peter Wasserscheid/FAU-CRT) TP 4: Photokatalytische Wasserspaltung und Thermo-chemische Energiespeicherung (Prof. Dr. Wilhelm Schwieger/FAU-CRT, Prof. Dr. Martin Hartmann/FAU-CRT)

Projektbericht EnCN1

Im Forschungsgebiet TRANSPORT werden Fragestellungen zur effizienten Nutzbarmachung von regenerativ erzeugten Energieäquivalenten bearbeitet, wobei wissenschaftliche Konzepte zur Speicherung und zum Transport im Vordergrund stehen. Das Projekt ist aus historischen Gründen sehr klein angelegt, so dass angesichts der thematischen Breite viele Aspekte nur in Vorbereitung späterer Drittmittelprojekte angerissen werden können.

1 Energiespeicherung via Wasserstoff in den Wasserstoff-Trägermolekülen

1.1 Evaluierung von Trägermaterialien

PROF. WOLFGANG ARLT

Im Rahmen des Unterprojektes wurde eine umfassende Studie zur Eignung von Konversionstechnologien zur Wasserstoffspeicherung unter dem Blickwinkel der Energieeffizienz durchgeführt. Ziel war es basierend auf vergleichbaren Systemanalysen die für verschiedene Szenarien besten Lösungen zu identifizieren. Untersucht wurden in diesem Zusammenhang die Speicherung in Ameisensäure, Fischer-Tropsch-Produkten, Flüssige Organische Wasserstoffträger (LOHCs), Methan, Methanol sowie die Einspeisung ins Erdgasnetz. Für sämtliche Varianten wurden Energieflussanalysen durchgeführt.

Die thermodynamischen Analysen der Wasserstoffspeicherrouten zeigten, dass sich mit den irreversiblen Konversionen nur vergleichsweise kleinen Wirkungsgrade erzielen lassen. Insbesondere die Umsetzung von Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid zu Ameisensäure weist sehr niedrige Speicherwirkungsgrade auf. Die Speicherung von Wasserstoff durch die Erzeugung von Fischer-Tropsch-Produkten oder Methanol erzielt etwas bessere Wirkungsgrade. Nichtsdestotrotz zeigte sich, dass diese Verfahren aus energetischer Sicht nicht sinnvoll sind. Die große Speicherdichte macht diese Ansätze aber für einzelne Anwendungen interessant. Lediglich über die Route der Methanisierung und der Einspeisung ins Erdgasnetz lassen sich befriedigende Wirkungsgrade erreichen. Die Evaluierung der Wirtschaftlichkeit deutet jedoch auf große ökonomische Probleme hin.

Gegenüber der irreversiblen Konversion zu Trägermolekülen, aus denen der Wasserstoff nicht mehr als solcher zurückgewonnen wird, haben sich für die reversible Konversion beträchtliche Vorteile gezeigt. Die reversible Bindung an organische Trägersubstanzen (LOHCs) wie Dibenzyltoluol oder Benzyltoluol erlaubt die Speicherung mit sehr hoher Energiedichte. Aufgrund der großen Potentiale der LOHCs wurden die weiteren Arbeiten nach Abschluss der Evaluierung aller relevanten Verfahrensvarianten auf diese fokussiert.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

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>

1.2 Weiterentwicklung von Wasserstoffträgern

PROF. WOLFGANG ARLT

Um die Forschung möglichst zielgerichtet durchführen zu können, wurde eine Studie zur Ermittlung der Stellschrauben mit dem größten Potential zur weiteren Verbesserung der LOHC-Technologie durchgeführt. Es zeigt sich, dass sowohl bezüglich Energieeffizienz als auch bezüglich Energiedichte Möglichkeiten zur Optimierung in der Verbesserung des Trägermaterials zu finden sind. Insbesondere die Anpassung der Reaktionsenthalpie (d.h. der Bindungsstärke des Wasserstoffs an den Träger) würde Potentiale zur Weiterentwicklung des Prozesses bieten. Daneben sind noch erhebliche Potentiale mit den elektrochemischen Wandlungsschritten und dem Flüssig-Dampf-Phasenverhältnis bei der Freisetzung verbunden (s. Abbildung 47).

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen wurden dabei drei Hauptthemen adressiert: die physikochemischen Eigenschaften der LOHC-Materialien, die Bestimmung des Hydriergrads und die Reinheit des aus dem LOHC freigesetzten Wasserstoffs.

Zur Ermittlung der Eigenschaften wurden zunächst Trennprozesse entwickelt, um komplexe LOHC-Mischungen aufzutrennen und so auch die teilhydrierten Zwischenstufen vermessen zu können. Es zeigten sich insbesondere in einigen Transportgrößen, wie der Viskosität, erhebliche Diskrepanzen zwischen den Eigenschaften der Mischungen und der Einzelkomponenten, was die Auslegung bisher stark erschwerte. Durch eine Messkampagne konnten nun sämtliche relevanten Stoffgrößen der LOHCs ermittelt werden.

Bei der Hydrierung bzw. Dehydrierung kommt es zumeist nur zu einem teilweisen Umsatz. Daher ist es für die Anwendung in der Praxis sehr wichtig, den Hydriergrad bestimmen zu können. Dieser spiegelt den gespeicherten Energieinhalt wider. Eine solche Messung muss schnell und einfach durchführbar sein. Die Korrelation mit physikalischen Eigenschaften der Mischung bietet sich hierfür an. Es zeigte sich jedoch für viele Größen, dass sie hierfür nicht geeignet sind, da sie nicht streng mit dem Hydriergrad korrelieren. Die Abschätzung über den Brechungsindex konnte allerdings als vielversprechend identifiziert werden. Erste Praxis-tests konnten diese Einschätzung bestätigen.

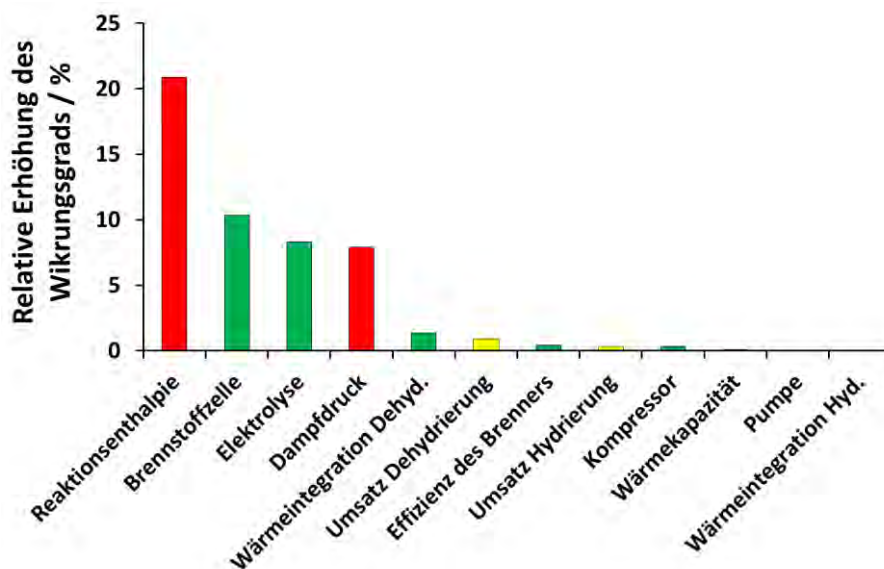


Abbildung 47: Potentiale zur Verbesserung der LOHC-Technologie
(rot: Verbesserungen des Trägerstoffs; grün: Verbesserungen der Anlagenkomponenten; gelb: Optimierung der Reaktionen)
©EnCN/Adametz_Müller

Eine große Herausforderung bei der Wasserstoffbereitstellung mit Hilfe von LOHCs ist die Reinheit des Wasserstoffs. Bei der Freisetzung kommt es zu einer Verdampfung eines Teils der Trägerflüssigkeit. Konzepte zur energieeffizienten Reinigung des Wasserstoffs wurden zunächst theoretisch evaluiert und im Labormaßstab entwickelt. Ein zweistufiges Verfahren erwies sich als die sinnvollste Variante. Dabei wird zunächst in einem Dephlegmator partiell kondensiert und anschließend in einem Adsorbentbett die nötige Feinreinigung durchgeführt. Anschließend konnte die Funktionstüchtigkeit des Systems in Pilotanlagen demonstriert werden.

1.3 Reaktorentwicklung für flüssige organische Wasserstoffträger

PROF. PETER WASSERSCHIED

Nach dem Ende des H₂-Industries-Projekts im Jahr 2014 wurde der Fokus am Energiecampus auf ein neuartiges Reaktorkonzept gelegt. Dieses soll sowohl die Hydrierung als auch die Dehydrierung eines flüssigen organischen Wasserstoffträgers in ein und demselben Apparat ermöglichen (daher auch der Name „One Reactor“).

Zusammen mit Partnern an der FAU (Lehrstuhl für elektronische Bauelemente, Prof. Frey) und am Fraunhofer-Institut (Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, IISB, Erlangen; Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, IIS, Nürnberg EnCN) wird gemeinsam ein Hybrid-Speicher mit LOHC-Technologie entwickelt. Dieses Projekt ist ein Teilprojekt des Leistungszentrums Elektroniksysteme, das anteilig durch die Fraunhofer-Gesellschaft und den Freistaat Bayern finanziert wird. Das Teilprojekt, das am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik stattfindet hat einen Umfang von 375.000 € mit einer Doktorandenstelle.

Der Hybrid-Energiespeicher soll direkt an das DC-Netz des Fraunhofer-Instituts in Erlangen angebunden werden und in einer geschickten Kombination aus Batteriespeicher, Wasserstoffdrucktank und LOHC-Speicher die effiziente Kurzzeit- und Langzeit-speicherung großer Mengen Energie demonstrieren. Als Leistungsgröße für den LOHC-Speicher sind für das Projekt 20 kW vorgesehen. Insgesamt soll eine Megawattstunde elektrischer Energie gespeichert werden können.

Herzstück des LOHC-Speichersystems ist der „one Reactor“, der von einer Mitarbeiterin am EnCN entwickelt wird. Im ersten Jahr des Projekts wurde der Reaktor ausgelegt und konstruiert. Ferner wurde das R&I-Fließbild inkl. aller sicherheitsrelevanter Bauteile erstellt und ein erstes Sicherheitskonzept für das System ausgearbeitet. Auf Basis des R&I-Fließbilds wurde in enger Zusammenarbeit mit den Partnern Fraunhofer IISB und IIS ein Steuer- und Regelkonzept in der Form von Ablaufdiagrammen sowie eines Zustandsautomaten entwickelt. Der Reaktor wurde am CRT fertig montiert und steht kurz vor der Erprobung. Nach der Versuchsphase wird der Reaktor als chemisches Speichersystem an das Fraunhofer-Institut IISB ausgeliefert und im Gesamtspeicher verbaut.

Der „one Reactor“ wurde als Wasser-Luft-System im Rahmen einer Masterarbeit nachgebaut und verschiedene relevante Betriebspunkte nachgestellt. Die aufgenommenen strömungstechnischen Kennzahlen sowie Informationen über das Verweilzeitverhalten liefern hilfreiche Hinweise auf die spätere Betriebsführung des Apparats. Aufgrund der interessanten Ergebnisse aus diesem Vergleichssystem wurde am EnCN ein sog. Drei-Phasen-Berty-Reaktor aufgebaut. Dieses Reaktionssystem ermöglicht die nahezu gradientenfreie Untersuchung dreiphasiger Reaktionssysteme (Katalysator, LOHC, Wasserstoff). Dieser Berty-Reaktor soll im EnCN 2 umfassende Erkenntnisse über Reaktionskinetiken und Stofftransportphänomene liefern.

Der Zustandsautomat, der der Steuerung zugrunde liegt, wurde in Form der relevanten Bauteile in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen IISB und CRT in ein Matlab-Simulink Modell umgesetzt. Dieses Modell erlaubt die dynamische Simulation verschiedener Anwendungsszenarien inkl. der Berücksichtigung der Systemdynamik mit ihren sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten (Elektrolyse für Wasserstoffherzeugung bis auf Vollast: 5-15 min, Brennstoffzelle bis auf Vollast: 30s bis 2 min, Reaktor bis auf Vollast: 30-60 min). Die Umsetzung der elektrochemischen Bauteile (Brennstoffzelle und Elektrolyse) wurde federführend vom IISB vorgenommen. Die Modellierung der reaktionstechnischen Komponenten (Wärmeübertragung in den Reaktor, Reaktion im Reaktor) stammt aus den Erkenntnissen, die am CRT am EnCN zuvor erarbeitet wurden.

Die Ergebnisse aus dem EnCN 1 sollen als Grundlage für die in EnCN 2.0 beantragten Arbeiten herangezogen werden. Dort sollen insb. Hydrierung und Dehydrierungen bei harschen Reaktionstemperaturen betrachtet werden sowie die LOHC-Dehydrierung mit alternativen Wärmequellen gekoppelt werden.

1.4 Oxidative Ameisensäureherstellung aus Biomasse

PROF. PETER WASSERSCHIED

Die oxidative Herstellung von Ameisensäureherstellung aus Biomasse wurde auf zwei Pfaden verfolgt. Zum einen wurde von Dr. Jakob Albert et al. die Forschung rund um das entwickelte Katalysatorsystem erweitert. Dabei lag der Fokus zum einen auf der Untersuchung neuer Substrate für die Herstellung von Ameisensäure aus Biomasse. Die Robustheit des Katalysatorsystems konnte sogar mit chemisch verunreinigten Substraten wie Klärschlämmen gezeigt werden.

Zum anderen wurde der Gesamtprozess durch die Entwicklung eines Extraktionsverfahrens hinsichtlich Ausbeute und Selektivität verbessert. Durch die Verwendung von 1-Hexanol als Extraktionsmittel für die organische Ameisensäure konnte die Selektivität im Vergleich zu Versuchen ohne Extraktionsmittel drastisch gesteigert werden. Bis zu 85 % Selektivität werden für die Oxidation von Glukose zur Ameisensäure + Kohlenstoffdioxid erreicht.

Neben der Forschung am Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik wurde die im letzten Jahresbericht erwähnte Firma OxFA GmbH als Joint-Venture aus der JBACH GmbH und der EnviTec Biogas AG gegründet. Die OxFA GmbH ist Projektpartner eines neuen Drittmittelprojekts im Umfang von 382.000 € und einer Doktorandenstelle. Im Rahmen des Projekts soll ein Apparat zur Umsetzung der Ameisensäure in elektrische Energie konzipiert und gebaut werden. Das Projekt startete in Q3/2015. Bisher wurde ein groß angelegtes Katalysatorscreening für die Identifizierung eines geeigneten Katalysators für die Zersetzung von Ameisensäure zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid durchgeführt.

Ein geeignetes Katalysatorsystem konnte identifiziert werden. Wie in der Literatur beschrieben kommt es bei diesem System zu einer Deaktivierung der aktiven Spezies. Es konnte ein Regenerationsprotokoll entwickelt werden, mit der die ursprüngliche Aktivität des Katalysators wiederhergestellt werden kann.

2 Feste, anorganische Energie Tragende Stoffe

PROF. ARLT

2.1 Identifizierung und Gegenüberstellung vielversprechender Gas-Feststoffreaktionen

Thermochemischen Energiespeicher auf Basis von reversiblen, nicht-katalytischen Gas-/Feststoffreaktionen werden eine hohe Speicherdichte sowie ein großes Potential zur saisonalen Energiespeicherung zugesprochen. In umfangreichen Studien wurde ein thermodynamisches Screening thermischer Direktdissoziationsreaktionen zur Identifizierung potentieller Reaktionen durchgeführt.

Dabei wurde neben den bereits in der Literatur diskutierten Systemen auch eine Reihe von „neuartigen“ Reaktionen als vielversprechend bewertet. Die untersuchten Reaktionstypen sind der Dehydratisierung von Hydroxiden, Decarboxylierung von Carbonaten, Desulfatisierung von Sulfaten, Dehydratisierung von Salzhydraten sowie die Deammonierung von Ammoniakaten zuzuordnen. Basierend auf unterschiedlichen Stabilitätskriterien konnten aus anfänglich 400 Reaktionen schließlich 125 als potentielle Systeme bestimmt werden. Diese decken Temperaturen bis 1600 °C ab. Für alle Reaktionen wurde das Reaktionsgleichgewicht gelöst und somit die Druck-Temperatur-Korrelation des monovarianten Systems angegeben werden. Die Systeme wurden im Anschluss auf stofflicher Ebene und Systemebene energetisch bewertet und gegenübergestellt. Durch die Einbeziehung reaktionsspezifischer Faktoren konnten darüber hinaus optimale Reaktionsbedingungen und Empfehlungen für die Speicherbetriebsweise angegeben werden. Die Studien sind von großer Bedeutung für die Entwicklung effizienter thermischer Speichersysteme.

2.2 Chemische Wärmepumpe

Thermochemische Energiespeicher auf Basis von Gas-Feststoffreaktionen sind durch ein monovariantes Reaktionsgleichgewicht charakterisiert. Demnach kann die Gleichgewichtstemperatur direkt über den Partialdruck der gasförmigen Komponente eingestellt und die Temperatur der Wärmeaufnahme und -abgabe regulieren werden. Damit ist die Realisierung einer chemischen Wärmepumpe möglich. In diesem Kontext wurden energetische und exergetische Analysen derartiger Gas-/Feststoffwärmepumpen für den Niedertemperaturbereich durchgeführt und eine thermodynamische These entwickelt, die die Vorhersage realer Betriebsbedingungen qualitativ ermöglicht.

2.3 NESTOR – Novel Energy Storage and Transport Concept Based on Concentrated Solar Irradiation-Aided CaO-Looping

Der Fokus der Arbeiten im Bereich der festen, anorganischen Energie Tragenden Stoffe lag auf dem vom BMBF geförderten Drittmittelprojekt mit dem Namen NESTOR, das als Folge dieses EnCN-Projektes eingeworben wurde. Wesentliche Ziele des Projektes sind die Material- und Prozessentwicklung für ein thermochemisches Energiespeicherkonzept im Hochtemperaturbereich. Das Projekt wurde in Kooperation mit zwei griechischen Materialforschungsinstituten durchgeführt. Im Zentrum des Projektes steht die reversible Carbonisierung/Decarbonisierung von CaO.

Im Rahmen dieses Projektes wurde auf griechischer Seite die Herstellung und Charakterisierung geeigneter CaO-basierter Materialien mit optimierter Zyklenstabilität durchgeführt. Mit Hilfe gemessener Stoffparameter der entwickelten Materialien wurden schließlich Reaktionsgleichgewichte modelliert, detaillierte Prozessoptionen erarbeitet und dynamische Simulationsmodelle zur Abbildung und Bewertung der Gesamtprozesskette entwickelt.

2.4 Kopplung des LOHC-Konzepts mit Thermochemischen Wärmespeichern

In umfangreichen Studien zur Effizienzsteigerung des an der FAU intensiv erforschten LOHC Konzeptes wurde die Kopplung der Hydrierung/Dehydrierung mit einem thermischen Energiespeicher untersucht. Zielsetzung der Untersuchungen war es, eine reversible chemische Reaktion zu identifizieren, die den Energiebedarf der LOHC Dehydrierungsreaktion reduziert. Basierend auf den Prozessbedingungen der LOHC Dehydrierung wurden über 200 Gas-Feststoffreaktionen betrachtet und deren Reaktionsgleichgewichte ermittelt. Dabei wurde im Speziellen ein Reaktionsschema gewählt, bei dem ein Metall oder Metalloxid mit Wasserdampf unter Wasserstofffreisetzung exotherm oxidiert wird. Die Regenerierung des Metalloxides erfolgt schließlich durch die Reduktion mit Wasserstoff. Vorteil dieses Schemas ist die prozesstechnisch günstige Kopplung mit dem LOHC Konzept. In Zusammenarbeit mit BUILDING II wurde die Zyklrierbarkeit von vier potentiell koppelbaren Reaktionen thermogravimetrisch untersucht. Dabei konnten thermodynamische und reaktionstechnische Charakteristiken der Systeme identifiziert und durch Modifizierung der Versuchsparameter wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.

2.5 Kooperationspartner

2.5.1 Extern (NESTOR Projekt)

- Department of Chemical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Thessaloniki, Griechenland
- Aerosol & Particle Technology Laboratory (APTL), CPERI at CERTH, Thessaloniki, Griechenland
- Institute of Nuclear & Radiological Sciences & Technology, Energy & Safety (INRASTES), National Centre of Scientific Research "DEMOKRITOS" (NCSR), Attikis/Athens, Griechenland

2.5.2 EnCN

- CRT (LOHC + TCS)
- MATSOL (Im Rahmen einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit dem EnCN Teilprojekt MATSOL wurde eine Konzeptstudie zum Einsatz von Thermochemischen Energiespeichern in Wohngebäuden und Siedlungen angefertigt)

2.6 Ausblick auf weitere Tätigkeiten

- Geplante Fortsetzung von NESTOR → NESTOR II, Kooperationspartner
 - APTL, NCSR (s.o.)
 - Prof. Dr.-Ing. B. Epple, Institut für Energiesysteme und Energietechnik, Technische Universität Darmstadt
 - Dr. M. Roeb, Institut für Solarforschung / Solare Verfahrenstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln

3 Photokatalysierte Wasserspaltung an Silikat-immobilisierten Photokatalysatoren

PROF. WILHELM SCHWIEGER

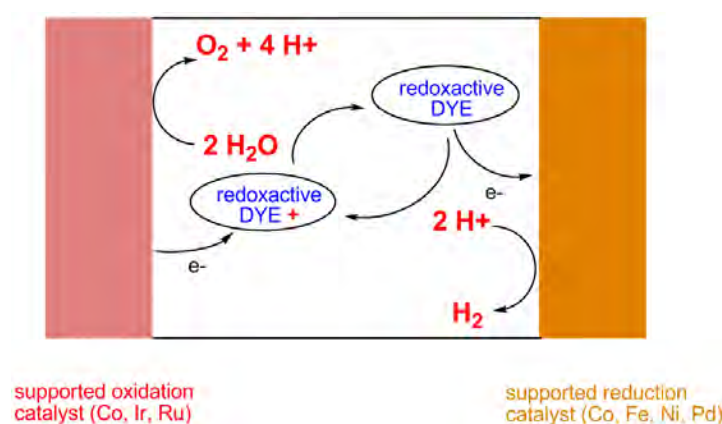


Abbildung 48: Schematische Abbildung des Konzepts für die photokatalytische Wasserspaltung.

Ziel des Gesamtprojektes war es, effiziente immobilisierter Oxidations- bzw. Reduktionskatalysatoren, die in Kombination mit geeigneten redoxaktiven Farbstoffen die Wasserspaltung in Wasserstoff und Sauerstoff zu entwickeln. Ein redoxaktiver Farbstoff soll hierbei als Elektronenüberträger dienen. Derartige Zentren - der Farbstoff, die Redoxzentren - sollen in einem Schichtsystem so eingebracht und stabilisiert werden, sodass sie auf engstem Raum kooperativ wirken können. Das Konzept ist in Abbildung 48 dargestellt.

Wesentliche Voraussetzung war die Interkalationsvorgänge systematisch zu untersuchen. Das Konzept des Interkalationsvorganges ist in Abbildung 49 schematisch dargestellt. In Abhängigkeit vom der Molekülgröße und der Beladungshöhe des Interkalates kann ein unterschiedlich großer Hohlraum zwischen den Schichten aufgespannt werden. Dies ist erforderlich, um den Zwischenschichtraum für die nachfolgenden Vorgänge zu öffnen.

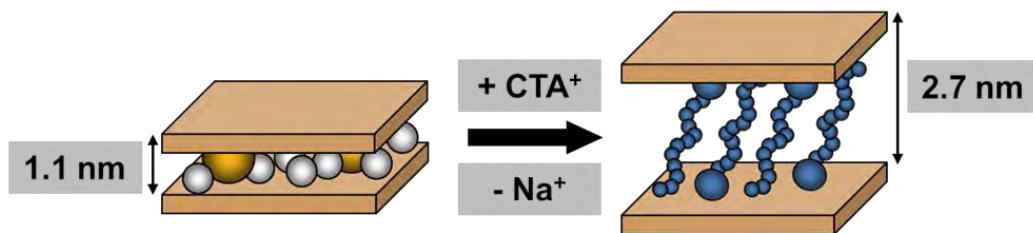


Abbildung 49: Schematische Darstellung des Interkalationsvorganges sowie die Veränderung des Basalabstandes, der durch die Interkalation hervorgerufen wird

Daraus ergaben sich als erstes die folgenden Aufgaben:

- (i) Herstellung Silikate und Interkalationsuntersuchungen an den Schichtsilikaten
- (ii) Einlagerungs-/Adsorptionsuntersuchungen von Farbstoffen und Metallkomplexen

3.1 Interkalationsuntersuchungen an verschiedenen Schichtsilikaten

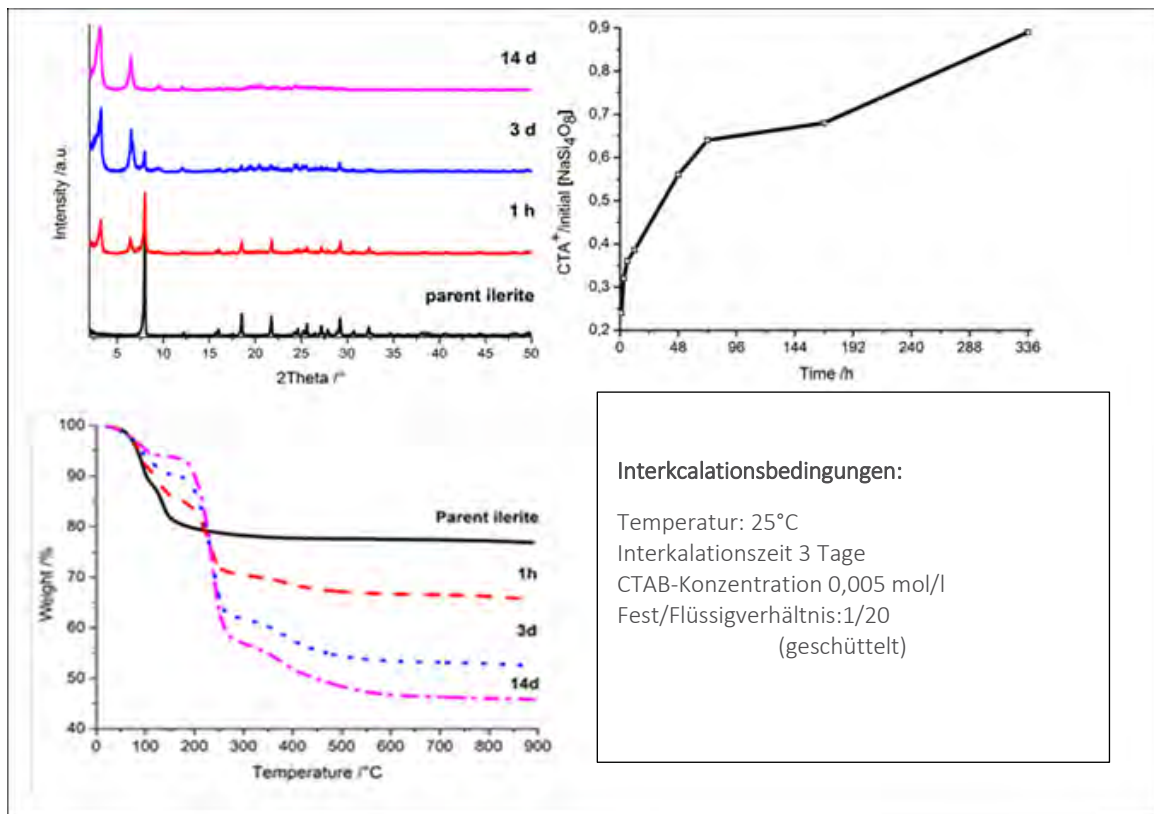


Abbildung 50: Interkalation von CTAB in Illerit: Abhängigkeit der Beladung von der Interkalationszeit (A: Röntgendiffraktogramme ausgewählter Proben; B: TG-Kurven ausgewählter Proben, C: CTA-Beladung in Abhängigkeit von der Zeit)

An den ausgewählten Schichtmaterialien (reine Schichtsilikate: SKS-6, Magadiite, Illerite; Aluminiumhaltige Silikate: Laponite, schichtartige Zeolithprecursor) wurde in einem ersten Schritt das Interkalationsverhalten experimentell untersucht. Hierbei wurden verschiedene Tenside (kationische, neutrale und anionische) unterschiedlicher Kettenlänge eingesetzt und deren Interkalationsverhalten charakterisiert. Über eine Variation der Versuchsbedingungen (Tensidart und -konzentration, Feststoff/Flüssigkeitsverhältnis, Temperatur, Zeit) wurden die Interkalationsbedingungen für die Einzelkomponenten unter dem Aspekt maximaler Voraufweitung festgelegt und die resultierenden Interkalationskomplexe charakterisiert.

Aufgrund dieser Ergebnisse (s. Abbildung 50) und der Verfügbarkeit der Silikate wurde dann Untersuchungen auf die Schichtsilikate Magadiite und Illerit begrenzt. Als wesentliches Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Interkalationen schon bei Raumtemperatur erfolgen kann, für einen statistischen Einbau der Tenside aber eine längere Zeit (bis zu 14. Tagen) benötigt.

3.2 Einlagerungs-/Adsorptionsuntersuchungen mit Farbstoffen und Metallkomplexen

Weiterhin wurden an dem aluminiumfreien Schichtsilikaten Einlagerungs-/Adsorptionsuntersuchungen mit Metallkomplexen und Farbstoffen durchgeführt. Als Modellsbstanz für die Metalle wurden Pt- und Pd-Tetramin-Komplexe sowie Cu-Tetramin-Komplexe und als Farbstoffmodellmolekül Neutralrot gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass bisher eine direkte Interkalation nur mit CTAB und den Edelmetallkomplexen gelingt. Neutralrot und der Cu-Tetramin-Komplex wurden zwar adsorbiert, was sich durch eine vollständige Entfärbung der Lösung äußerte, aber die Interkalation konnte noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Demgegenüber konnte für Pt-Komplexe hohe Austauschgrade (bis zu nahezu 100%) bei einer Beladung von bis zu 20% Pt erreicht und auch das gewünschte Einbringen in die Zwischenschicht realisiert werden.

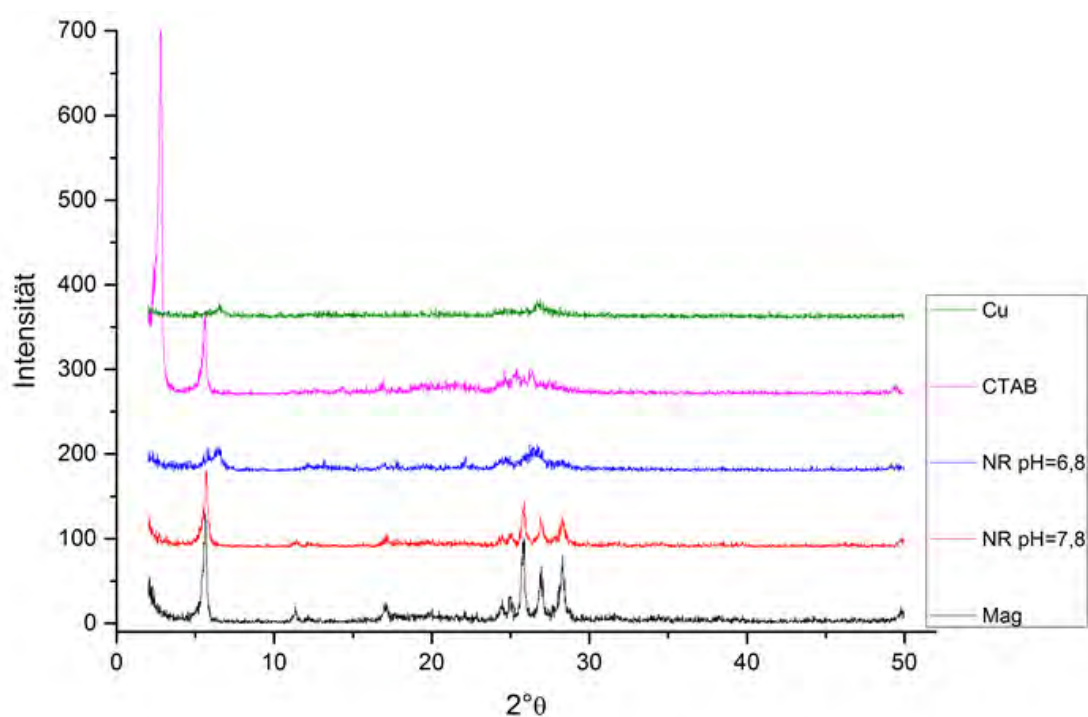


Abbildung 51: Vergleich der Röntgendiffraktogramme der verschiedenen Stoffe (Cu: Kupfertetramin-Komplex, CTAB: mit CTAB interkaliert, NR: Neutralrot als Modellfarbstoff) mit dem Ausgangsmagadiit (Mag).

3.3 Ausblick

Insbesondere sollen in der Zukunft die erfolgreichen Interkalationsuntersuchungen mit Tensiden und den Edelmetallkomplexen optimiert und kombiniert werden, um die gewünschten Mischinterkalate zu erhalten. In einen zweiten Schritt sollen dann die Messungen auf Tonminerale und Schichtzeolithe übertragen werden, da hier Synergien erwartet werden können.

4 Thermochemische Energiespeicherung bei Temperaturen über 100 °C

PROF. MARTIN HARTMANN

4.1 Thermochemische Energiespeicherung bei Temperaturen über 100 °C

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.

Tabelle 2: 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
Calciumoxid - Wasser	$CaO + H_2O \rightleftharpoons Ca(OH)_2 + \Delta H_R$	400 – 600 °C
Calciumoxid - Kohlenstoffdioxid	$CaO + CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + \Delta H_R$	850 – 1000 °C

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

Im Fokus dieses Projektes stehen Reaktionssysteme, welche auf Feststoffen basieren. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über Systeme, auf die sich die Forschung in den letzten Jahrzehnten besonders konzentriert hat.

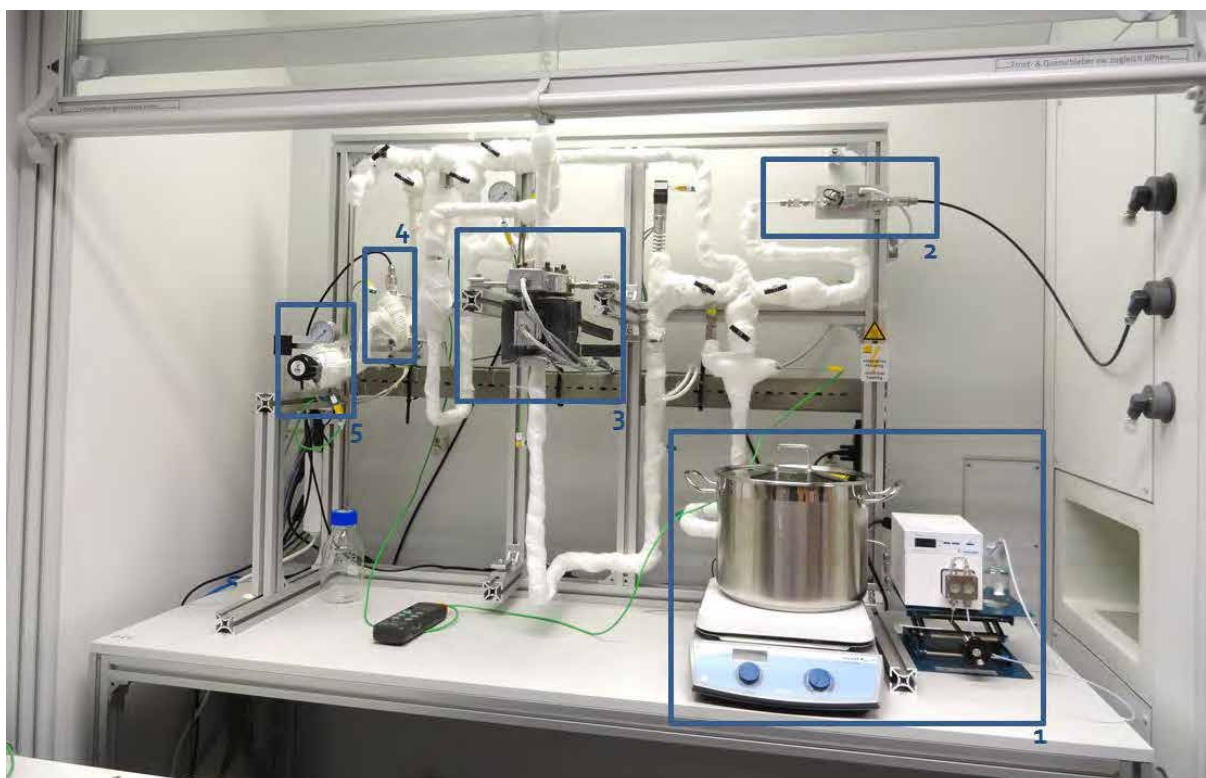


Abbildung 52: Laboranlage zum Testen thermochemischer Wärmespeicher
(1 Wasserdosierung und Verdampfung; 2 Gasdosierung; 3 Reaktor; 4 Feuchtesensor; 5 Druckregler)

In diesem Teilprojekt soll die Energiespeicherung bis zu einer Temperatur von 600 °C genauer untersucht werden, sodass sich die Teilprojekte 2 und 4b ergänzen. Vorangegangene Arbeiten an verschiedenen Forschungseinrichtungen haben die Kinetik, Thermodynamik und Beständigkeit der Reaktionssysteme $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ [1], $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}$ [2] und $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ [3] eingehend analysiert. Allerdings wurde bei allen Reaktionssystemen bei wiederholten Speicherzyklen eine Agglomeration der Partikel beobachtet, wenn die reinen Salze bzw. Metalloxide verwendet werden. Dies wirkt sich negativ auf die Zyklenstabilität der Speichermaterialien aus. Um dies zu verhindern, werden die Metalloxide bzw. Salze auf einen porösen Träger aufgebracht. Das Ziel sind langzeitstabile Speicher mit einer hohen Speicherdichte.

Zurzeit werden als Trägermaterial kommerziell erhältliche Extrudate aus Aluminiumoxid eingesetzt. Des Weiteren sollen selbstsynthetisierte geordnete, mesoporöse Silikate verwendet werden, die ein hohes spezifisches Porenvolumen besitzen ($> 1 \text{ cm}^3/\text{g}$). Diese Stoffe weisen eine einheitliche Porengrößenverteilung auf. Außerdem kann während der Synthese der Porendurchmesser und das Porenvolumen beeinflusst werden. Am EnCN wurden diese Materialien eingehend bei 550 °C unter Wasserdampf-atmosphäre auf ihre Stabilität hin untersucht. Die geordneten Mesoporen blieben hierbei über einen langen Zeitraum erhalten und das Material verfügt damit über eine gute Stabilität unter Reaktionsbedingungen.

Um die hergestellten Kompositmaterialien als chemische Wärmespeicher zu testen, wurde im Laufe des Jahres 2015 die in Abbildung 52 gezeigte Laboranlage aufgebaut. Darin sollen die Materialien insbesondere auf ihre Zyklenstabilität hin untersucht werden. Der Reaktor ist für eine Maximaltemperatur von 600 °C und einen Druck von 3 bar ausgelegt. Er fasst ein Probenvolumen von ca. 100 ml.

Die wichtigsten bisherigen Ergebnisse sollen an zwei Beispielen mit den System $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ und $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ veranschaulicht werden. Dafür wurden sowohl CaCl_2 als auch MgO in das Porensystem von kommerziell erhältlichen Extrudaten aus Aluminiumoxid eingebracht. Es zeigte sich bei Versuchen in oben beschriebener Laboranlage (Abbildung 52), dass bei der Hydratisierung von CaCl_2 ein Temperaturhub von ca. 60 °C erreicht werden kann (Abbildung 53a). Folglich sind die Wärmeabgabe und damit eine Entladung des Speichers sehr gut möglich. Für die Dehydratisierung bzw. das Aufladen des Wärmespeichers soll das System $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ betrachtet werden (Abbildung 53b). Bei der gezeigten thermogravimetrischen Messung wird deutlich, dass sich die Dehydratisierungstemperatur von $\text{Mg}(\text{OH})_2$ um ca. 60 °C verringern lässt, wenn $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in das Porensystem eines Trägermaterials eingebracht wird. Ein Herabsetzen der Aufladetemperatur ermöglicht einen flexibleren und effizienteren Einsatz thermochemischer Speicher.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das hier vorgestellte Konzept zur thermochemischen Energiespeicherung in Temperaturbereichen, die beispielsweise für das LOHC-System relevant sind, funktionsfähig ist und Vorteile gegenüber den in der Literatur bekannten Konzepten bietet.

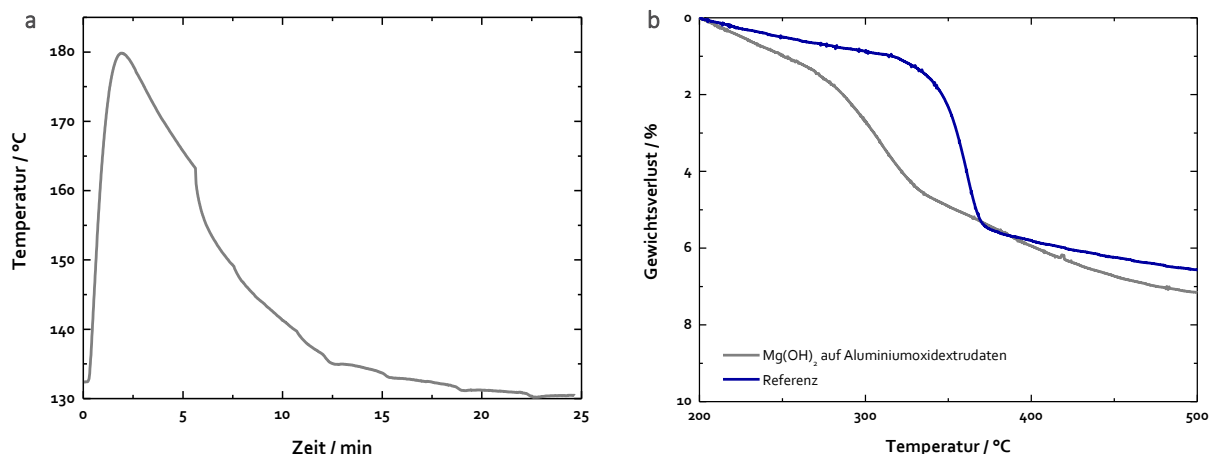


Abbildung 53: a) Hydratisierung von CaCl_2 imprägniert auf Aluminiumoxidextrudaten mit einem reinem Dampfstrom von 0,5 g/min; b) Thermogravimetrische Messung von $\text{Mg}(\text{OH})_2$ imprägniert auf Aluminiumoxidextrudaten im Vergleich zu einer Referenz (physikalische Mischung aus $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und Aluminiumoxid im gleichen Verhältnis).

Im Rahmen des EnCN 2.0 sollen insbesondere die Zyklenstabilität der Speichermaterialien und die Speicherdichte optimiert werden.

[1] M. Molenda et al., *Thermochemica Acta*, 2013, 560, 76-81

[2] C. Roßkopf et al., *Energy Conversion and Management*, 2015, 97, 94-102

[3] P. Pardo et al., *Solar Energy*, 2014, 107, 605-616

5 Veröffentlichungen

- [1] Christoph Krieger, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Thermodynamic analysis of reversible hydrogenation for heat storage in concentrated solar power plants. *Solar Energy*, 123, 40, 2016
- [2] Jonas Obermeier, Benjamin Müller, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Energy storage and transportation based on solar irradiation-aided CaO-looping. *Energy Technology*, 4, 123, 2015
- [3] Karsten Müller, Katharina Stark, Vladimir N. Emel'yanenko, Mikhail A. Varfolomeev, Dzmitry Hennadzievich Zaitsau, Evgeni Shoifet, Christoph Schick, Sergey P. Verevkin, Wolfgang Arlt. Liquid Organic Hydrogen Carriers: Thermophysical and Thermochemical Studies of benzyl- and dibenzyl-toluene derivatives. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54, 7967, 2015
- [4] Jonas Obermeier, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Thermodynamic analysis of chemical heat pumps. *Energy*, 88, 489, 2015
- [5] Irma Schmidt, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Evaluation of Formic-Acid-Based Hydrogen Storage Technologies. *energy & fuels*, 28, 6540, 2014
- [6] Karsten Müller, Florian Fabisch, Wolfgang Arlt. Energy Transport and Storage using Methanol as a Carrier. *Green - The International Journal of Sustainable Energy Conversion and Storage*, 4, 19, 2015
- [7] Karsten Müller, Jin Geng, Wolfgang Arlt. Reversible vs. Irreversible Conversion of Hydrogen: How to Store Energy Efficiently?. *Energy Technology*, 1, 42, 2013
- [8] Karsten Müller, Johannes Völkl, Wolfgang Arlt. Thermodynamic Evaluation of Potential Organic Hydrogen Carriers. *Energy Technology*, 1, 20, 2013
- [9] Karsten Müller, Jin Geng, Johannes Völkl, Wolfgang Arlt. Energetic Evaluation of the Feeding-in of Hydrogen into the Natural Gas Distribution System. *Chemie Ingenieur Technik*, 84, 1513, 2012
- [10] Patrick Preuster, Christian Papp, Peter Wasserscheid, Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy, *Accounts of Chemical Research*, 2016

NET

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen IIS</p> <p>Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB</p> <p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Department Elektrotechnik-Elektronik-Informationstechnik (EEI) Lehrstuhl für elektrische Energiesysteme (EES) Lehrstuhl für technische Elektronik (LTE) Lehrstuhl für Informationsübertragung (LIT) Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik (LEE)</p> <p>Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm Institut ELSYS</p>	<p>Arbeitsgebiet 1: Energieflusssteuerung im Stromnetz der Zukunft und dessen Komponenten</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Energieflusssteuerung im Netz (MegaWatt-Leistungselektronik) (Dirk Malipaard/ Fraunhofer IISB) 2 Neue schutz- und leittechnische Methoden und Komponenten für elektrische Energieversorgungs-netze mit dezentralen Stromerzeugungsanlagen (Prof. Dr. Johann Jäger/ FAU-EES) 4 Hybride Netzarchitekturen unter Berücksichtigung des regenerativen Energiedargebots (Prof. Dr. Johann Jäger/ FAU-EES) 3 Evaluierung der Lebensdauer von Energieversorgungsnetzen, -anlagen und -komponenten unter Berücksichtigung moderner Mess- und Diagnoseverfahren (Prof. Dr. Matthias Luther/ FAU-EES; Prof. Dr.-Ing. Christian Weindl/ HS Coburg) 5 Oberschwingungsreduktion (Prof. Dr. Norbert Graß/ TH-Nürnberg-ELSYS) <p>Arbeitsgebiet 2: Elektrische Energiespeicher im Netz</p> <ol style="list-style-type: none"> 6 Schnittstellen zwischen stationären Energieversorgungsnetzen und mobilen Verbrauchern (Christopher Joffe/Fraunhofer IISB, Steffen Müller/FAU-LTE) 7 Elektrische Energiespeicher im Netz (Dr. Vincent Lorentz/Fraunhofer IISB) 8 Smart Grid Solar - Wirtschaftlich und technisch optimierte Integration regenerativer Energien (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther/FAU-EES) 9 Auslegung und Optimierung intelligenter Verteilnetzstrukturen durch Integration elektrischer Batteriespeichersysteme (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther; FAU-EES) 10 ENGiNe – das hybride Energiespeichernetz am EnCN (Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther; FAU-EES) <p>Arbeitsgebiet 3: Informations- und Kommunikationstechnik für das Energienetz der Zukunft</p> <ol style="list-style-type: none"> 11 Funktechnologien (Josef Bernhard/Fraunhofer IIS, Matthias Kuba /Fraunhofer IIS, Andreas Oeder/Fraunhofer IIS) 12 Power Line Technologien (Steffen Müller/FAU-LTE, Matthias Kuba /Fraunhofer IIS) 13 Systeme und Anwendungen (Martin Bergmann/Fraunhofer IIS, Peter Heusinger/Fraunhofer IIS) <p>14 Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik (Prof. Dr.-Ing. Martin März/FAU-LEE)</p>

Projektbericht EnCN1

Im Projekt NET mit den drei Arbeitsgebieten „Energieflusssteuerung im Stromnetz der Zukunft und dessen Komponenten“, „Elektrische Energiespeicher im Netz“ und „Informations- und Kommunikationstechnik für das Energienetz der Zukunft“ konnten viele, aber bei weitem nicht alle relevanten technischen Aspekte des zukünftigen Smart Grid adressiert werden. Optimierte Auslastung der Netzbetriebsmittel, Einsatz von Leistungselektronik und die verstärkte Nutzung von lokalen Speichern werden in Zukunft eine herausragende Rolle im elektrischen Netz spielen. Dazu wurden im Projekt Technologien und neue Verfahren für Netzbetrieb und -schutz entwickelt und der Einsatz in Demonstrationsprojekten erprobt. Die Steuerung der am Smart Grid angeschlossenen Anlagen und Akteure stellt nach wie vor eine höchst komplexe Herausforderung dar. Dazu müssen allgemein verfügbare Informationstechnologien und zum Teil energiemanagementspezifische Technologien sowohl den zeitkritischen Netzbetrieb mit der Kopplung zu nichtelektrischen Energienetzen sicherstellen, als auch den Anforderungen aus Energiehandel und -abrechnung unter Berücksichtigung von regulatorischen und IT-Sicherheits-Vorgaben genügen. Trotz dieser sich fortlaufend ändernden Rahmenbedingungen konnten auch im Kerngebiet der Informations- und Kommunikationstechnik signifikante Beiträge mit Hardware und Software geliefert und verwertet werden. Im Jahr 2016 nahm der neu geschaffene „Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme“ in den Räumen des EnCN seine Arbeit auf. Er wird von Prof. Dr.-Ing. Martin März geleitet.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Karlheinz Ronge
Fraunhofer-Institut für
Integrierte Schaltungen IIS



E-Mail
Karlheinz.Ronge@encn.de

Telefon
+49 911 / 58061 9300

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/znb1chf>

1 Energieflusssteuerung im Netz (MegaWatt-Leistungselektronik)

1.1 Projekthintergrund

Leistungselektronische Systeme sind eine der Kerntechnologien, die den Wandel der Energieversorgung zu einem energieautarken regenerativen Gesamtsystem ermöglichen. Dies betrifft die gesamte Kette der elektrischen Energieversorgung von der Energieerzeugung über den Transport und die Verteilung bis zu den Verbrauchern.

Insbesondere durch die Einführung neuartiger modularer Multilevel-Umrichter besteht die Möglichkeit, den Energiefluss im Netz mit sehr hoher Flexibilität und Effizienz zu steuern. Der Schwerpunkt dieses Teilprojektes liegt in der Entwicklung von innovativen leistungselektronischen Teilkomponenten für modulare Multilevel-Anwendungen in der Energieversorgung. Vorrangiges Anwendungsfeld sind Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsstrecken (HGÜ). Derzeit sind bereits vier HGÜ-Strecken, basierend auf der modularen Multilevel-Technologie, für die Netzanbindung von Offshore-Windparks vor der deutschen Küste im Betrieb, weitere Anlagen befinden sich in Planung oder bereits im Bau. Im aktuellen Netzausbauplan bilden Systeme basierend auf dieser Technologie einen wesentlichen Grundpfeiler für den Energieferntransport entlang der deutschen Nord-Süd-Achse. Die DC-Übertragungstechnik ist die Grundvoraussetzung für eine effiziente Energiefernübertragung mit abschnittsweiser Erdverkabelung zur Erhöhung der Akzeptanz in der Bevölkerung. In diesen neuen Anwendungsfeldern hat sich die modulare Multilevel-Technologie aufgrund ihrer erheblichen Systemvorteile innerhalb kürzester Zeit durchgesetzt, sodass davon auszugehen ist, dass zukünftig eine Vielzahl weiterer Anlagen errichtet wird. Neben den HGÜ-Strecken gibt es im elektrischen Energienetz zahlreiche weitere Anwendungsfelder für diese Technologie, wie z. B. statische Blindleistungskompensation (SVC) oder die bidirektionale Kopplung unterschiedlicher Netze.

1.2 Ziele des Teilprojekts

Ziel dieses Teilprojekts war es, durch innovative Teilkomponenten die Effizienz und Lebensdauer dieser modularen Multilevelumrichter zu steigern und gleichzeitig die Systemkosten zu reduzieren.

Bisher realisierte Systeme bestehen intern aus Hochspannungsleistungshalbleitern in klassisch aufgebauten Modulgehäusen mit isolierter Grundplatte, wie sie heute in industriellen Antrieben und bahntechnischen Traktionsanwendungen eingesetzt werden. Die modulare Multilevel-Technologie stellt, verglichen zu sonstigen Anwendungen, eine Reihe von besonderen Anforderungen an die Leistungshalbleiter, erlaubt dafür an anderen Stellen deutlich mehr Freiheitsgrade im Aufbau. Es bestehen somit im Design der Schaltzellen für modulare Multilevel-Umrichter erhebliche Optimierungspotentiale. Um die Leistungsfähigkeit insbesondere der Halbleiter vollständig auszuschöpfen, wurde in diesem Teilprojekt ein vollkommen neues Moduldesign mit einer speziell abgestimmten Aufbau- und Verbindungstechnik entwickelt und qualifiziert.

Eine besondere Herausforderung besteht in den hohen Lebensdauernanforderungen für energiewirtschaftliche Anwendungen mit Einsatzdauern von über 40 Jahren. Da der gesamte Industriesektor „Leistungselektronik“ erst vor ca. 35 Jahren entstand, war es erforderlich, die in diesem Projekt erarbeiteten neuen Aufbaukonzepte und -technologien frühzeitig durch beschleunigte Alterungstests und angepasste Alterungsmodelle zu qualifizieren. Vorrangiges Ziel war es, in diesem Teilprojekt Technologien zu erproben, die es ermöglichen, durch einen angepassten und vereinfachten Aufbau zukünftig die Gesamtsystemkosten weiter zu reduzieren.

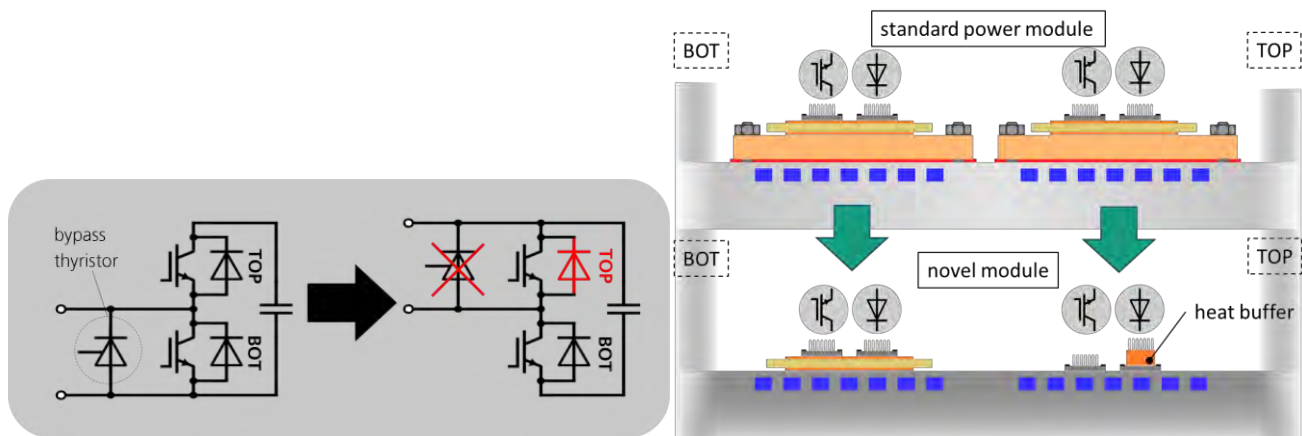


Abbildung 54: Neues Aufbaukonzept für HGÜ-Schaltzellen

1.3 Zusammenfassung der erfolgten Arbeiten und Ergebnisse

Das Hauptaugenmerk dieses Teilprojekts lag in der Entwicklung eines Technologiedemonstrators einer optimierten HV-Schaltzelle mit 6,5kV Halbleitern für Modulare Multilevelsysteme. Um frühzeitig Systemerfahrung zu sammeln und in die Auslegung der Schaltzelle einfließen zu lassen, wurde parallel ein Systemdemonstrator mit stark herunterskalierten Leistungsdaten als Testumgebung aufgebaut.

In 2012 wurden parallel zum Aufbau des Leistungselektroniklabors am EnCN vorrangig vorbereitende theoretische Arbeiten, wie die Optimierung der Systemsimulation und -auslegung sowie die Simulation der elektrischen Felder in den kritischen Isolationssschichten, durchgeführt. Nach Einrichtung und Bezug des Labors standen 2013 insbesondere der Aufbau eines Systemdemonstrators und die Charakterisierung von unterschiedlichen Aufbautechniken der HV-Schaltzelle im Vordergrund. Eine besondere Herausforderung bestand in der direkten Verbindung von Halbleiterchips und Kühlstruktur ohne Isolationskeramik. Aus diesem Grund wurden frühzeitig Lebensdaueruntersuchungen durch aktive Lastwechselfersuche durchgeführt, um die neuartigen Aufbautechnologien zu evaluieren.

2014 wurde das mechanische Aufbaukonzept der HV-Schaltzelle entwickelt. Besonderes Augenmerk wurde in dieser Phase auf die thermische Optimierung der Kühlstruktur und die Charakterisierung neuer Randstrukturkonzepte für kostengünstigere Isolationskeramiken gelegt. Zudem wurden umfangreiche Lebensdaueruntersuchung neuer Aufbau- und Verbindungstechnologien zur direkten Verbindung von dickeren Hochspannungs-Halbleiterchips und Kühlstrukturen ohne Isolationskeramik durchgeführt. In 2015 standen insbesondere die Optimierung und Qualifizierung des erarbeiteten Aufbaukonzepts im Vordergrund. Parallel wurde der Systemdemonstrator aufgebaut und bereits segmentweise in Betrieb genommen. Die dabei gesammelten Erfahrungen dienten als Grundlage für weitere Entwicklung der HV-Schaltzelle. Diese gesamten Voruntersuchungen bilden die Basis für den Aufbau eines Demonstrators der neuen Schaltzelle. Der Aufbau und die abschließende messtechnische Qualifizierung dieser Schaltzelle wurden in 2016 abgeschlossen.

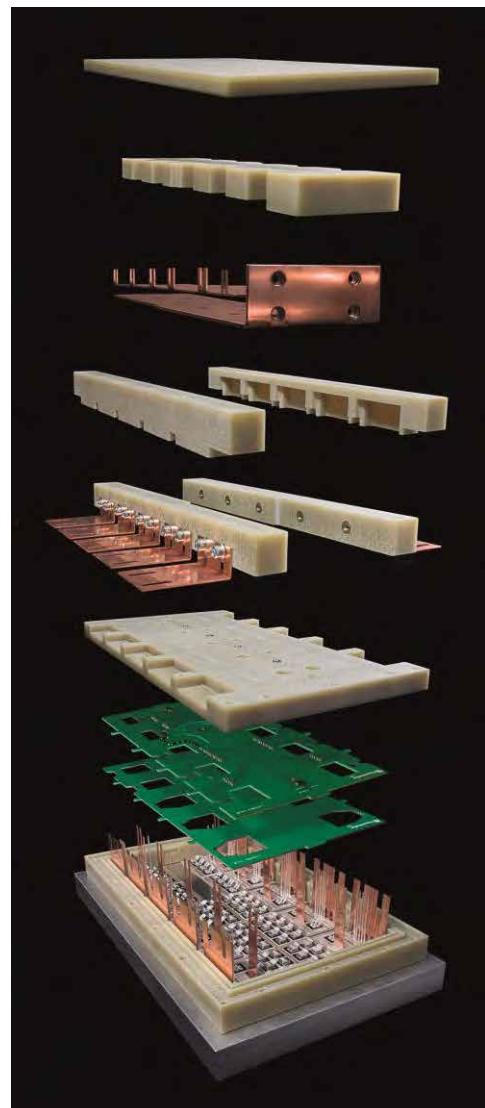


Abbildung 55: Explosionsdarstellung Schaltzellenprototyp

Die Überlastfähigkeit sowie die ggf. benötigten Schutzkomponenten bilden ein wichtiges Designkriterium für die Entwicklung der Schaltzelle. Heute realisierte Systeme besitzen z. B. pro Schaltzelle einen externen Bypassthyristor, der die zellinternen Dioden im Fall von Kurzschlüssen auf der DC-Leitung vor zu großen Stoßströmen schützt. Durch eine Kombination aus modifizierter Schaltungstopologie, optimierter Kühlstruktur und neuen Maßnahmen zur Erhöhung der Stoßstromfestigkeit konnte die Überlastfähigkeit soweit gesteigert werden, dass keine zusätzlichen externen Schutzkomponenten benötigt werden, wodurch die Systemkosten weiter reduziert werden können. Durch die neue Schaltungstopologie kann die Stoßstrombelastung von der Bottom- auf die Top-Diode verlagert werden. In dem angepassten Aufbaukonzept kann bei den oberen Halbleitern auf eine Isolation zum Kühlkörper verzichtet werden, wodurch eine deutlich bessere Kühlung möglich ist. Zudem wurden Heat-Spreader zwischen den Halbleiterchips und dem Kühlkörper und zusätzliche Heat-Buffer auf den Bauelementen in Simulation und Experiment untersucht. Durch eine geeignete Kombination dieser Aufbautechniken ist nur eine geringfügige Erhöhung der Chipfläche notwendig, um die notwendige Stoßstromfestigkeit der Diode zu erreichen. Der Aufwand hierfür ist im Vergleich zu den heute verwendeten externen Schutzkomponenten deutlich geringer. Zudem wird keine Überwachungs- und Ansteuerelektronik benötigt, was zu einer weiteren Vereinfachung des Systems bei gleichzeitig erhöhter Fehlertoleranz beiträgt. Die Auswirkungen dieser Aufbauänderungen auf die Lebensdauer des Systems wurden durch entwicklungsbegleitende Alterungstests untersucht.

Die beschriebenen Arbeiten erfolgten durch die Arbeitsgruppe Energiesysteme, die das Fraunhofer IISB am EnCN neu gegründet hat. Das EnCN-Projekt bildete die Grundlage für eine Vielzahl bilateraler Industrieprojekte im Bereich Multilevel-Umrichter und Netzanbindung regenerativer Energiequellen. Im Bereich der Leistungselektronik für große Leistungen konnten unter Einbindung der regionalen Industrie weitere Drittmittelprojekte akquiriert werden. Hierbei werden beispielsweise Umrichter für industrielle DC-Mittelspannungsnetze („DC-Direkt“, BMBF) und effizientere Bahntriebssysteme („Roll2Rail“, EU) untersucht. Im Rahmen dieser Projekte wird die Arbeitsgruppe Energiesysteme den Themenschwerpunkt „MegaWatt-Leistungselektronik“ auch nach Auslaufen der EnCN-Anschubfinanzierung beibehalten und die aufgebaute Infrastruktur am EnCN weiter nutzen. Durch eine enge Kooperation mit dem neugegründeten Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik (LEE) wird der Forschungsschwerpunkt Leistungselektronik am Standort EnCN weiter ausgebaut. Die Ergebnisse dieses Teilprojekts fließen in den Aufbau eines Mittelspannungstestsystems auf Basis modularer Multilevelumrichter am LEE.

2 Neue schutz- und leittechnische Methoden und Komponenten für elektrische Energieversorgungsnetze mit dezentralen Stromerzeugungsanlagen

2.1 Übersicht

Die Arbeiten im Teilprojekt „Neue schutz- und leittechnische Methoden“ zum Thema „Adaptivschutz“ haben im Dezember 2012 begonnen, die für das Thema „Automatisierte Koordination des Netzschutzes“ Anfang 2014. Beide Themen sind jeweils durch eine Vollzeit-Arbeitskraft besetzt und werden in Zusammenarbeit mit der Division Energy Management Netzschutzentwicklung der Siemens AG in Berlin durchgeführt. Ab Ende 2015 wurden zudem Arbeiten zum Themenbereich „HGÜ und Schutz“ durchgeführt, die die vorangegangenen Themen geeignet ergänzen.

2.2 Adaptivschutz

Innerhalb der elektrischen Energieversorgungsnetze stellt die Schutztechnik einen unverzichtbaren Bestandteil dar. Vor dem Hintergrund des aktuell stattfindenden tiefgreifenden Wandels in der elektrischen Energieversorgung ergibt sich als neue Herausforderung für die Schutz- und Leittechnik den gewohnt hohen Netzsicherheitsstandard zu erhalten. Dies kann mit den derzeit verfügbaren Methoden und technischen Lösungen nur unzureichend erfüllt werden. Deshalb ist für die Gestaltung zukünftiger, innovativer Versorgungsnetze eine systematische und ganzheitliche Erarbeitung neuer Methoden und Konzepte für die Schutz- und Leittechnik dringend erforderlich.

Als Lösungsansätze werden erstmals adaptive Verfahren und die intelligente Verarbeitung lokal verfügbarer Informationen auf Basis analytischer Netzberechnung verfolgt. Mit Einsatz von Kommunikationstechnik sind der geforderte Sicherheitsstandard und die notwendige Robustheit von Schutzsystemen kaum zu erreichen. Daher soll für den Primärschutz zunächst auf Kommunikationstechnik verzichtet werden. Kommunikationstechnik auf Stationsebene nach IEC 61850 und stationsübergreifende Kommunikation zur Doppelung und Optimierung der Schutzsysteme werden lediglich als Lösungsansätze für Reserveschutzsysteme verfolgt.

Insgesamt wurden Arbeiten zu den Unterthemen „Adaptiver Lastausschnitt“, „Weiterentwicklung der Reaktanz-Methode“, „Adaptive Pausenzeit bei einpoliger Kurzunterbrechung“, „Re-design Distanzschutz“ und „HGÜ und Schutz“ durchgeführt.

Adaptiver Lastausschnitt

Es wurde ein neues Verfahren zur Festlegung des Lastausschnittes in der Impedanzebene auf Basis der physikalischen Grenzen der Übertragungsfähigkeit einer Hochspannungsleitung eingeführt. Dies ermöglicht kleinere Ausschnitts-flächen und damit eine höhere Auslastung der Leitung bei gleichbleibender Schutzsicherheit (protection security). Eine Veröffentlichung zu diesem Thema wurde auf dem IEEE PES General Meeting 2016 (peer reviewed) präsentiert und als

ein „Best Conference Paper“ ausgezeichnet [12]. Dieses Verfahren wurde zudem zum Patent angemeldet [1].

Weiterentwicklung der Reaktanz-Methode

Das bereits bekannte „Reaktanzverfahren“ zur Impedanzmessung umfasst eine vorteilhafte Resistanzmessung, bei der das Messergebnis in Abhängigkeit des Netzzustandes (Normalbetrieb oder Fehlerzustand) geeignet verzerrt wird. Dies macht es robust gegenüber Fehlanregungen im Hochlastfall. Dabei werden jedoch Leitergrößen mit symmetrischen Komponenten verquickt, sodass Einbußen hinsichtlich der Leiterselektivität entstehen und damit die Gefahr von Fehlanregungen aufgrund von Scheinimpedanzen wächst. In diesem Projekt konnte die Reaktanzmethode weiter entwickelt werden, sodass die Leiterselektivität bei gleichbleibender Robustheit gegenüber Fehlanregungen im Hochlastfall deutlich verbessert wurde [58][7].

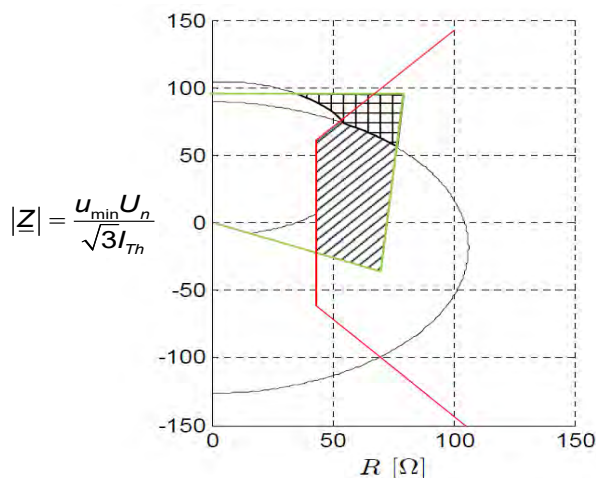


Abbildung 56: Darstellung der Lastausschnittsvergrößerung in der Impedanzebene [12]

Adaptive Pausenzeit bei einpoliger Kurzunterbrechung

In elektrischen Netzen werden Kurzunterbrechungen eingesetzt, um Lichtbogenfehler durch Unterbrechen der Energiezufuhr zu klären. Im Falle eines einpoligen Lichtbogenfehlers, wird auch nur dieser Leiter beidseitig unterbrochen, sodass ein Teil der Leistung von den beiden fehlerfreien Leitern weiter übertragen werden kann und keine Stabilitätsprobleme hervorgerufen werden. In diesem Fall wird der Lichtbogen weiterhin induktiv und kapazitiv über die fehlerfreien Leiter mit Energie versorgt. Die Zeit, nach der der Lichtbogen erloschen ist und der fehlerbehaftete Leiter wieder zugeschaltet werden kann, wird als Pausenzeit bezeichnet. Sie ist bestimmt durch die Eigenschaften des Lichtbogens, die Spannungshöhe und die Leitergeometrie der Freileitung.

Die Pausenzeit darf nicht zu groß gewählt werden, um die transiente Stabilität nicht zu gefährden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Polradwinkel schon durch die großen übertragenen Leistungen erhöht sind, ist es Ziel der Untersuchungen, in diesem Bereich die Pausenzeit möglichst gut an die Brenndauer des Lichtbogens anzupassen und damit die Pausenzeit auf ein Mindestmaß zu verkürzen.

Alle bisherigen Verfahren basieren auf der Auswertung der Spannung auf dem fehlerhaften Leiter. Dabei wird Betrag oder Frequenzspektrum der gemessenen Spannung ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass diese Verfahren für Schutzzwecke nicht robust genug sind.

Ausgehend von Labor und Feldmessungen wurde eine vereinfachte Messvorschrift entwickelt, die auf Basis relaislokaler Messgrößen den sekundären Lichtbogenstrom bestimmt und damit einen Rückschluss auf die nötige Pausenzeit bis zur sicheren Löschung des Lichtbogens erlaubt. Dieses Verfahren wurde zum Patent angemeldet [2] und in der Zeitschrift IEEE Transactions on Power Delivery in einer Sonderausgabe für zukunftsweisende Schutzthemen (Special issues on „Frontiers of Power System Protection“) im August 2016 veröffentlicht [13].

Re-design Distanzschutz

Ein weiteres Thema war ein grundlegendes Re-design des Distanzschutzalgorithmus auf Basis der Fuzzy-Logik. Die Fehlererkennung (Unterscheidung Normalbetrieb oder Fehlerzustand), als die wichtigste Entscheidung in der Schutztechnik, soll hierbei neu gestaltet werden. Bisher wurde dazu die resistive Zonenreichweite genutzt, die jedoch bei hohen Lastströmen zur Überfunktion führt und somit der Netz- und Schutzsicherheit schadet. Dies soll durch eine Fehlererkennung mit Hilfe von Fuzzy-Logik ersetzt werden. Da Fehlerszenarien oft nicht mit scharfen Grenzen vom Normalbetrieb unterschieden werden können, bietet hier die Fuzzy-Logik Vorteile. Erste Simulationen haben eine gute Tauglichkeit dieses Ansatzes bereits nachgewiesen. Die Ergebnisse wurden auf mehreren R&D-Kolloquien mit dem Drittmittelgeber diskutiert und als vielversprechend bewertet [59] [60]. Daher ist geplant dieses Thema mit den eingeworbenen Drittmitteln weiter zu führen.

HGÜ und Schutz

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsstrecken (HGÜ) übernehmen in den elektrischen Energieversorgungsnetzen mehr und mehr die Aufgabe der Leistungsfernübertragung. Aufgrund ihrer Übertragungskapazität bis weit in den Gigawattbereich können ihre Einflüsse über die Umrichterstationen und die DC-Leitung auf das bestehende Netz nicht mehr vernachlässigt werden. Insbesondere müssen die Einflüsse auf die Netzschutztechnik umfänglich geklärt sein, um nicht Einbußen hinsichtlich der Netz- und Schutzsicherheit zu erhalten. Dazu wurden zunächst Untersuchungen zu den elektromagnetischen Kopplungen verteilter Leitungsmodelle auf sogenannten AC/DC-Hybridmasten angestellt. Damit war es möglich die Koppelmechanismen und die darauf basierenden Einflüsse auf die Schutztechnik umfassend zu untersuchen. Die Ergebnisse wurden bisher auf zwei Fachkonferenzen publiziert [64] [8] und haben bereits zur Anbahnung weiterer Drittmittelprojekte auf dem Gebiet „HGÜ und Schutz“ geführt.

2.3 Automatisierte Koordination des Netzschutzes

Zu diesem Thema wurden unterschiedliche heuristische Optimierungsverfahren für eine netzweite vollautomatisierte Koordination des Netzschutzes untersucht. Die Bearbeitung teilte sich in drei Themenkomplexe auf: Das Datenmodell, die Bewertung des Netzschutzes (Evaluation) und das Optimierungsverfahren selbst. Diese sind in Abbildung 57 übersichtlich dargestellt.

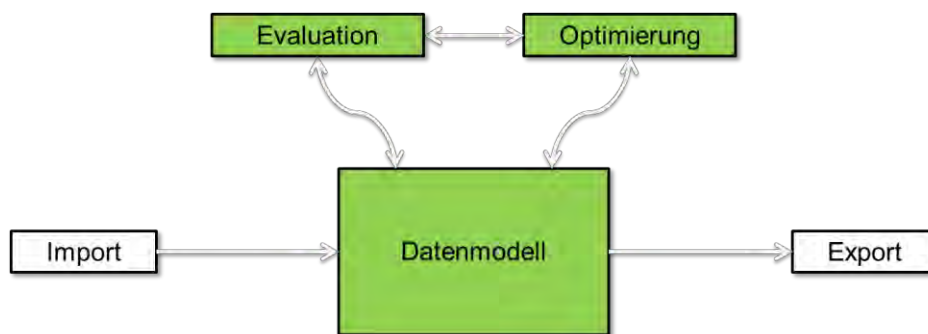


Abbildung 57: Thematische Struktur

Das Datenmodell basiert auf dem Generic Data Model (GDM), welches der Gegenstand von mehreren studentischen Arbeiten war. Der Entwurf basiert auf einem CIM-basierten Datenmanagement. Die Umsetzung macht sich Methoden aus der theoretischen Informatik, sowie Graphentheorie und Suchalgorithmen zu Eigen. Die Arbeiten zum Datenmodell sind abgeschlossen. Es befindet sich bereits erfolgreich in der Anwendung.

Die Bewertung einer Netzkonfiguration kann auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen:

1. Bewertung des Systemverhaltens
2. Bewertung der Einstellwerte

Die Bewertung des Systemverhaltens ist die grundlegende Idee hinter SIGUARD®PSA (Protection Security Assessment), was in den vergangenen Jahren entwickelt wurde. Der große Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, „hidden weak spots“ aufzudecken. Dieses Werkzeug steht zur Anwendung bereit und wird im Rahmen von Netzstudien hinsichtlich der Schutzkoordination eingesetzt. In der letzten Phase dieses Projektes diente SIGUARD®PSA als eine alternative Bewertungsmöglichkeit und als Vergleichsverfahren [61] [62] [63] [65].

Die Bewertung der Einstellwerte basiert auf einer Fuzzyifizierung der Einstellwerte und liefert schnelle Ergebnisse. Weiterhin lässt sich leicht eine Rückkopplung zur Optimierung einführen, weshalb diese Methode Gegenstand aktueller Forschung ist [5] [6].

Es wurden drei heuristische Optimierungsverfahren ausgewählt, die am Ende des Projektes zum Vergleich zur Verfügung standen.

Ein genetischer Algorithmus (GA) wird seit 2011 erfolgreich am Lehrstuhl EES eingesetzt. Die Nachbildung der Evolution ist eine populations-basierte Optimierung, die sich durch ein zuverlässiges Erreichen guter Werte auszeichnet. Die bisherigen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Algorithmus in der Lage ist, ein Netz zu optimieren, aber nur im Rahmen der Vorgaben aus der Bewertung. Weiterhin sind die Steuerparameter von entscheidender Bedeutung. Der Algorithmus selbst ist fertig und die Steuerparametern feinjustiert[66].

Die Tabu-Suche (TS) stellt eine Erweiterung des klassischen „Bergsteiger-Algorithmus“ dar. Sie ist ein mathematisches Verfahren, welches deterministisch lokale Optima überwinden kann. Es wurde ein TS-Algorithmus entworfen, welcher ein vereinfachtes Netz mit einer vereinfachten Bewertung optimiert. Der Algorithmus selbst ist in das Gesamtprojekt integriert, sodass systemweite Netze mit den oben genannten Bewertungsverfahren bearbeitet werden können.

Die Particle Swarm Optimization (PSO) und die Weiterentwicklungen Evolutionary PSO (EPSO) und Differential Evolution EPSO (DEPSO) wurden bei der Competition „Application of Modern Heuristic Optimization Algorithms for Solving Optimal Power Flow Problems“ als überaus effektiv dargestellt. Die Ergebnisse wurden 2014 beim IEEE PES General Meeting in Washington im Rahmen der panel session „Modern Heuristic Optimization Test Bed on OPF“ vorgestellt. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse konnten wichtige Fortschritte auf dem Gebiet der Schutzkoordination mit einem PSO-Algorithmus erzielt und mit den GA- und TS-Verfahren verglichen werden. Die Ergebnisse wurden auf zahlreichen nationalen wie internationalen Fachkonferenzen erfolgreich publiziert [9] [10][11]

3 Evaluierung der Lebensdauer von Energieversorgungsnetzen, -anlagen und -komponenten unter Berücksichtigung moderner Mess- und Diagnoseverfahren

3.1 Entwicklung eines Messsystems zur dielektrischen Diagnose von 20kV-Mittelspannungskabeln und weitergehende Methoden zur Zustandsbeurteilung

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten erstmals zentrale Methoden und Verfahren aus umfangreichen Laborversuchen zum Alterungsverhalten von 20kV-Papier-Massekabeln einer Applikation in Form von Felduntersuchungen innerhalb des Energieverteilungsnetzes zugeführt werden. Hierzu war es erforderlich, ein im Feld nutzbares, mobiles und neuartiges Mess- und Prüfsystem zur Ermittlung des Verlustfaktors und weiterer diagnostischer Kenngrößen von 20kV-Mittelspannungskabeln zu entwickeln und aufzubauen.

Das am EnCN entworfene Gesamtsystem wurde 2015 mit Unterstützung einer weltweit tätigen, industriellen Partnerfirma (BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH) mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Zustandsdiagnose unterschiedlicher Kabelarten und des Baus von Kabelmesswagen in ein Fahrzeug implementiert und wird seit der Fertigstellung zur Durchführung von Diagnosemessungen im Netz des Kooperationspartners, der Main-Donau-Netzgesellschaft mbH (MDN), eingesetzt. Anhand der Messergebnisse soll mittelfristig eine deutlich verbesserte Beurteilung des Zustands der untersuchten Kabelstrecken und langfristig eine Abschätzung der Restlebensdauern möglich werden. Zur erfolgreichen Umsetzung des Projekts wurde die im Jahre 2014 geschlossene Kooperation mit dem regionalen Netzbetreiber (MDN) 2015 um die oben genannte Partnerfirma erweitert. Aus Projektsicht konnte somit sichergestellt werden, dass die äußerst wichtigen Arbeitspunkte der Entwicklung und des Aufbaus eines eigenständigen feldgeeigneten Messsystems zur Erfassung der dielektrischen Kenngrößen und des Einbaus des Prototypensystems in ein Messfahrzeug erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Die am EnCN entwickelten Diagnosesysteme wurden hierbei um eine hochqualitative VLF-Spannungsquelle aus dem Hause der Partnerfirma ergänzt und in das Gesamtsystem der durch Projektmitarbeiter realisierten Steuerungs- und Überwachungssoftware integriert. Um einen gefahrlosen Betrieb des Diagnosewagens zu ermöglichen, wurden durch die Fa. Baur den Anforderungen des Personen- und Anlagenschutzes entsprechende Sicherheitsschaltungen implementiert.

Der im Projektrahmen entwickelte Kabelmesswagen für Diagnosemessungen stellt somit eine völlige Neuentwicklung dar und verfügt über mehrere Alleinstellungsmerkmale. Eine Besonderheit besteht in der Ausstattung des Wagens mit zwei Spannungsquellen, die Messungen mit verschiedenen Prüfspannungen (50 Hz und 0,1 Hz bzw. VLF) erlauben. Somit ist man erstmals in der Lage, korrelierende Diagnosekriterien und entsprechende Verfahren zu untersuchen, die unter anderem eine genauere Analyse sowie eine Erweiterung der physikalischen Ersatzschaltungen der untersuchten Isoliersysteme ermöglichen werden. Zudem sind die Messsysteme neben der Diagnose der dielektrischen Eigenschaften auch für eine zusätzliche und quasisimultane Erfassung des Teilentladungsverhaltens geeignet. Im Zusammenhang bleibt anzumerken, dass der gesamte Diagnoseablauf vollautomatisch durch ein Computersystem gesteuert und überwacht wird, wodurch eine Fehlbedienung und darauf basierende fehlerhafte Diagnosen weitgehend ausgeschlossen werden können.

Nach erfolgreicher Integration der Komponenten wurde das Gesamtsystem in den Laboratorien des Energiecampus erprobt und der Funktionsablauf, die Bedienung und die Softwaresysteme an die Anforderungen der Praxis in enger Abstimmung mit erfahrenen Messtechnikern angepasst. Weiterhin war es erforderlich, die hochgenauen Messsysteme einer umfangreichen Kalibrierung zu unterziehen und zu verifizieren, dass diese auch unter Feldverhältnissen korrekte Ergebnisse liefern können.

Wegen der in realen Mittelspannungsstationen vorherrschenden komplexen Feld- und Erdungsstromverhältnisse und den bereits in der Mittelspannungstechnik notwendigen großräumigen Prüfkreisen mussten hierbei umfangreiche Analysen und Messungen im Labor und in spezifischen Stationen durchgeführt werden.



Abbildung 58: Entwickelter Messwagen mit neuartigen und hochspezifischen Mess- und Diagnosefunktionen zur Zustandsbeurteilung von Energieversorgungskabeln des für die Energiewende wichtigen Verteilnetzes

Durch klare Anweisungen der automatisierten Mess- und Steuerungssoftware können die in der Station notwendigen Arbeiten gezielt und mit einem minimalen personellen Aufwand umgesetzt werden. Die durch das Personal durchzuführenden Tätigkeiten beschränken sich somit in erster Linie auf das Anschließen des Messwagens an die Station (Versorgung, Erdungs- und Sicherheitskreise) sowie das Anschließen der zu untersuchenden Kabelprüflinge an den Messwagen (Prüfspannungen, glasfaserbasierte Signalleitungen, etc.). Durch die Integration einer Streckendatenbank können die entsprechenden Daten vor Beginn der Messung übernommen, abgeändert oder auch neu eingetragen werden, so dass die Ergebnisse in direkter Weise streckenbezogen interpretiert und ausgewertet werden können. Da auch die beiden Prüfspannungsquellen vom PC ferngesteuert werden, laufen auch die Messungen vollkommen automatisch nach vorab festgelegten Messzyklen und mit frei wählbaren Prüfspannungspegeln ab.



Abbildung 59: Messsystem und Kabelmesswagen während Messung an einer Mittelspannungsstation

Nach Abschluss der Messungen werden die Diagnosewerte zusammen mit allen weiteren relevanten Informationen (Strecken-daten, Prüfparameter, Protokollinformationen, etc.) in einem Datenbanksystem abgelegt. Die hierdurch möglich werdenden Analysefunktionen gehen über die der am Markt verfügbaren Systeme weit hinaus, da neben der weitaus größeren Zahl der bei unterschiedlichen Prüfspannungen erfassten Messwerte erstmals eine Korrelation mit empirisch gewonnenen Daten aus Alterungsversuchen möglich wird. Zudem können Abhängigkeiten von Streckencharakteristika, Kabel- und Umgebungstemperaturen, Prüfspannungsamplituden und -frequenzen und dem Teilentladungsverhalten der Kabelprüflinge untersucht, bewertet und berücksichtigt werden.

Der entwickelte Messwagen befindet sich seit Oktober 2015 im regulären Einsatz. Durch die infolge des hohen Automatisierungsgrades erreichbaren vergleichsweise schnellen Mess- und Prüfabläufe ist es möglich bis zu zwei Strecken pro Tag dreiphasig selektiv zu diagnostizieren. Bis zum Ende des Jahres 2016 werden somit bereits Informationen zu ca. 200 Einzelprüflingen vorliegen, so dass erste Aussagen zur Zustandsbeurteilung und zur Restlebensdauerbestimmung möglich sind.

Da in den Wintermonaten temperatur- und wetterbedingt keine bzw. kaum Diagnosemessungen durchgeführt werden können, werden die Arbeiten bis Mitte 2018 in einem derzeit bereits laufenden Industrieprojekt fortgesetzt werden. Ziel ist es, insgesamt 250 unterschiedliche Kabelstrecken - d.h. 750 Einzelprüflinge - exakt zu analysieren und auf der Basis der Diagnosedaten weitergehende Verfahren zu einer auf Lebensdauermodellen basierenden Zustandsprognose zu etablieren.

Das Forschungsvorhaben kann somit einen wichtigen Beitrag leisten, dass die im Zeichen der Energiewende immer wichtiger werdenden Verteilnetze zukünftig betriebs- und letztendlich auch volkswirtschaftlich möglichst kostengünstig und zugleich zuverlässig und sicher betrieben werden können. In die bisher den Ausfall von Betriebsmitteln einschließende Instandhaltung werden perspektivisch den Zustand berücksichtigende Aspekte einzubringen sein. Durch das Projekt können wichtige Indikatoren und Eingangsdaten für eine veränderte Instandhaltungsstrategie und eine Anpassung des Asset-Managements geliefert werden. Wegen der steigenden Anforderungen und der zunehmend volatilen Belastungen der Netzbetriebsmittel (Nutzung regenerativer und dezentraler Energien, Elektromobilität, etc.) werden intelligente und zustandsorientierte Verfahren der Instandhaltung in den kommenden Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen.

3.2 Zustandsdiagnose an Mittelspannungskabeln in Echtzeit

Derzeit basieren nahezu alle verfügbaren Diagnosesysteme darauf, dass Betriebsmittel für deren Diagnose freigeschaltet werden, d.h. während der Prüfung nicht mehr für den regulären Netzbetrieb zur Verfügung stehen. Durch die notwendigen Schaltmaßnahmen erfolgt ein Eingriff in das Elektroenergiesystem, der mit erheblichen Kosten und meist auch mit einem temporären Verlust der Redundanz einhergeht. Neben den Kosten entstehen somit Einschränkungen des Betriebes, wodurch die Messungen aus Aufwandsgründen regulär nur in größeren zeitlichen Abständen durchgeführt werden können. Im Rahmen des Projekts „Zustandsdiagnose an Mittelspannungskabeln in Echtzeit“ wurden daher Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um Methoden entwickeln und bewerten zu können, die eine Echtzeitanalyse von Mittelspannungs- und ggf. auch Hochspannungskabelsystemen ermöglichen. Die zentrale Zielstellung ist hierbei die zukünftige Entwicklung von Verfahren bzw. Systemen, die eine kontinuierliche Zustandsdiagnose von Betriebsmitteln ohne Unterbrechung des Betriebs erlauben.

Online-Verfahren haben gegenüber periodisch ablaufenden Diagnosemessungen den Vorteil, dass sich abzeichnende Ausfälle von Betriebsmitteln bereits vorab und basierend auf kontinuierlichen Bewertungen diagnostiziert werden können. Erforderliche Arbeiten, wie z.B. Instandhaltungs- oder Ersatzmaßnahmen, könnten so - unter Vermeidung von Versorgungsunterbrechungen - bereits vorab bzw. frühzeitig geplant und durchgeführt werden. Somit versetzen zuverlässige Echtzeitdiagnoseverfahren den Netzbetreiber in die Lage einer aus wirtschaftlicher Sicht optimalen Instandhaltung, da Reparatur oder Austausch erst dann durchgeführt werden müssen, wenn es der Zustand der Betriebsmittel erforderlich macht. Die technisch möglichen Nutzungszeiten von Betriebsmitteln können so nahezu vollständig ausgeschöpft werden, ohne die Versorgungszuverlässigkeit maßgeblich zu verschlechtern.

Zu Beginn des Projekts wurde die für eine Ableitung, Untersuchung und Verifikation der notwendigen hochgenauen und im Netz zu verteilenden Messstationen benötigte Laborinfrastruktur analysiert. Basierend auf einem ersten Laboraufbau zur Entwicklung und Analyse unterschiedlicher Synchronisationsverfahren wurde im Jahr 2015 das Anforderungsprofil und die Grundstruktur einer geeigneten Laborumgebung entwickelt. Bei Online-Verfahren kommt unter anderem den aus den Lastflussverhältnissen resultierenden Betriebsbedingungen eine zentrale Bedeutung zu. Aufgrund der bei den Echtzeitprüfungen erforderlichen, sehr hohen Durchgangsleistungen im mehrfachen MVA-Bereich können für Laborprüfungen nur synthetische Prüfschaltungen eingesetzt werden, durch die der Leistungsbedarf erheblich reduziert werden kann. Basierend auf den Analysen der technischen Rahmenbedingungen und der Möglichkeiten von Laboruntersuchungen diagnostischer Echtzeitverfahren wurden Leistungskomponenten aufgebaut, um die notwendigen Prüfspannungen mit der erforderlichen Leistung in zukünftigen Projekten zur Verfügung stellen zu können.

Es ist geplant, dass die theoretisch abgeleiteten Prinzipien und die bereits modellierten Verfahren zur Echtzeitdiagnose zukünftig in industriellen Nachfolgeprojekten im Rahmen eines Laboraufbaus untersucht und weiterentwickelt werden. Um das hierfür notwendige empirische Prüfsystem für Echtzeitdiagnosesysteme vollständig aufbauen und betreiben zu können, gilt es, die laufenden Gespräche mit einem potenziellen Kooperationspartner im folgenden Jahr erfolgreich zum Abschluss zu bringen.

3.3 Ortsaufgelöste Evaluierung dielektrischer Eigenschaften von Energieversorgungskabeln

Kabel haben bereits im Mittelspannungsbereich häufig eine Ausdehnung von mehreren Kilometern. Im Hochspannungsbereich liegen die Streckenlängen häufig weit darüber. Somit stellen diese häufig räumlich weit ausgedehnte Betriebsmittel dar, deren qualitative Isolationseigenschaften sich über die Länge hinweg erheblich unterscheiden können.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wird dieser für den zuverlässigen Betrieb äußerst wichtigen Eigenschaft erstmals Rechnung getragen, indem zusammen mit einem industriellen Drittmittelgeber (Seba Dynatronic Mess- und Ortungstechnik GmbH) geeignete technologische Mess- und Diagnoseverfahren entwickelt, untersucht und für den Feldeinsatz qualifiziert werden. Die Anwendung der Verfahren soll es zukünftig ermöglichen, dass die dielektrischen Kenngrößen sowie die qualitativen Eigenschaften von MS-Energieversorgungskabeln ortsaufgelöst, d. h. über deren Länge hinweg, bei Felduntersuchungen ermittelt werden können. Durch neue und verbesserte Messverfahren soll mittels einer ortsaufgelösten Evaluierung der dielektrischen Eigenschaften eine Zustandsdiagnose einzelner Kabelsegmente oder sogar die Identifizierung verstärkt gealterter Bereiche ermöglicht werden. Eine der grundlegenden Zielstellungen ist hierbei, alle relevanten Leitungsparameter eines untersuchten Prüflings ortsaufgelöst darstellen zu können.

In ersten Teil des Projekts wurden basierend auf Simulationsrechnungen und Laboraufbauten Grundlagenuntersuchungen durchgeführt und ein neuartiges Verfahren entwickelt, das erstmals eine ortsaufgelöste und zerstörungsfreie Messung der dielektrischen Eigenschaften von Energieversorgungskabeln ermöglicht. Durch weitergehende Laborstudien wurden dann Grenzen und einschränkende Kriterien erarbeitet und die Verfahren anhand dieser weiter optimiert. Auf der Basis begleitender computerbasierter und hardwarenaher, d.h. auf die Erfassungshardware abgestimmter Simulationsrechnungen, konnte die Auflösung der Algorithmen schrittweise weiter verbessert werden. Die grundlegenden qualitativen Eigenschaften der Methodik wurden zwischenzeitlich auch durch erste Labormessungen an realen Kabelprüflingen bestätigt. Die hierbei erreichbare Sensitivität und Ortsauflösung übertrifft die aktuell am Markt verfügbaren Lösungen erheblich. Wegen des zu erwartenden sehr hohen Marktpotentials wurde in der Folge eine weltweite Patentierung des Verfahrens zusammen mit der industriellen Partnerfirma vorangetrieben.

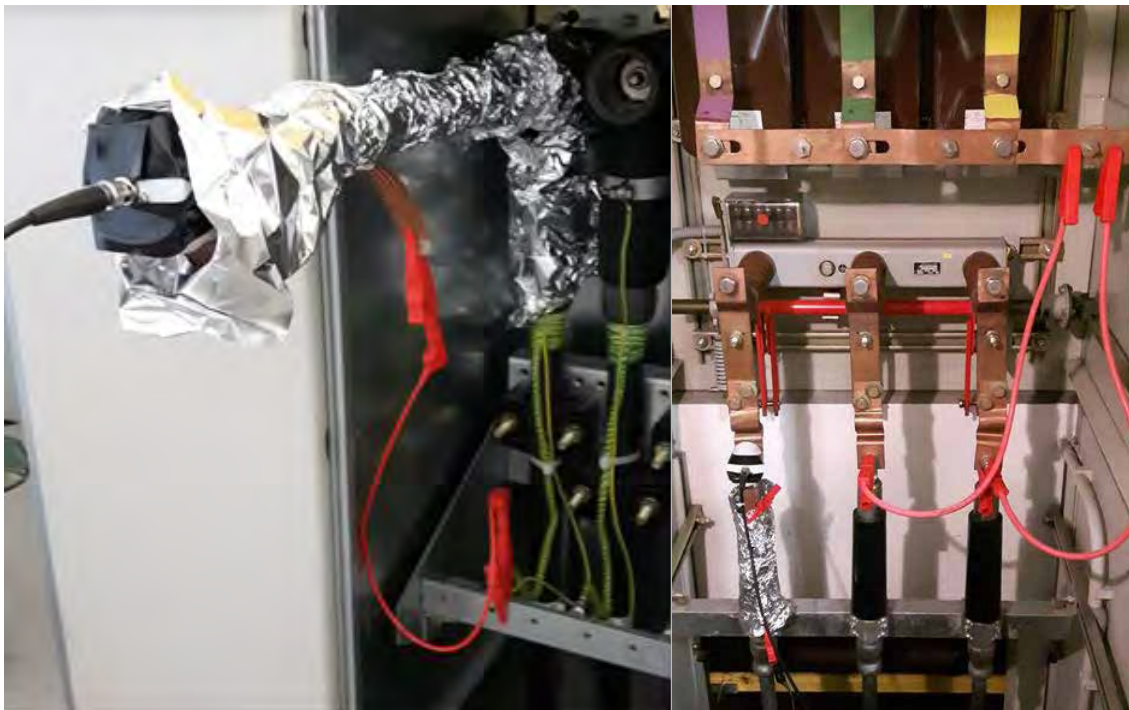


Abbildung 60: Erste Messversuche im Feld zur Abschätzung von Messbedingungen und Störeinflüssen.

Wegen des häufig heterogenen Aufbaus bestehender Kabeltrassen (Mischkabelstrecken) und des auf Wanderwellen basierenden Diagnoseprinzips sind die Anforderungen an die erforderlichen Mess- und Erfassungssysteme und die zur Verfügung stehenden Rechensysteme erheblich. Um diese und die entwickelten Methoden geeignet untersuchen zu können war es nötig, sehr verschiedenartige Versuchsaufbauten mit bekannten dielektrischen Eigenschaften sowohl im Labor zu realisieren als auch in hochauflösenden Computermodellen zu simulieren. Hierdurch konnten weitere wichtige Erkenntnisse zur Ableitung, Korrelation und Interpretation ortsauflösender Diagnosekenngrößen geschaffen werden. In ersten Feldmessungen an Mittelspannungskabeln

(Abbildung 60) wurden die Funktionsfähigkeit des Verfahrens erfolgreich getestet sowie Umweltbedingungen und Störeinflüsse untersucht und abgeschätzt. Zudem war es möglich, den Einsatz begrenzende Kriterien (Anschlussbedingungen, Kontaktierungsverhältnisse, Rauschen, etc.) zu analysieren, so dass diese nachfolgend z.B. durch eine Optimierung der digitalen Filterverfahren kompensiert bzw. eliminiert werden können.

Es zeigt sich, dass das neuentwickelte Verfahren detailliertere Informationen über den dielektrischen Zustand bereitstellen und bereits sehr geringe Veränderungen des Dielektrikums detektieren kann. Basierend auf den bis Mitte 2016 erarbeiteten Ergebnissen (Simulationsrechnungen, Laboruntersuchungen und Feldmessungen) konnten wichtige Erkenntnisse für die Auslegung eines zu entwickelnden Prototypensystems gewonnen werden.

Derzeit erfolgt der Aufbau und die Programmierung eines funktionsfähigen und feldgängigen Prototypen des ortsauflösenden Diagnosesystems, mit dem im weiteren Projektverlauf verstärkt auch Feldmessungen durchgeführt werden sollen. Das neue Prototypensystem wurde hierzu im Jahr 2016 ausführlich im Labor getestet und für den Feldeinsatz qualifiziert, wofür u.a. weitere Komponenten, wie z.B. die Entwicklung und Realisierung einer extrem breitbandigen Verstärkerschaltung sowie eines Adapters zur Impedanzanpassung zu entwickeln waren. Erste Messungen zeigten, dass sowohl die Ortsauflösung als auch die Sensitivität der Ergebnisse durch die neue Hardware nochmals deutlich verbessert werden konnten. Zudem konnte die notwendige Erfassungs- und Verarbeitungszeit gegenüber dem ursprünglichen Laborsystem erheblich reduziert werden. Durch einen ca. um den Faktor 2000 reduzierten Zeitbedarf ergeben sich erheblich erweiterte Möglichkeiten im Bereich der digitalen Filterung, Rauschunterdrückung und Stützstellenberechnung sowie der daraus resultierenden Ortsauflösung und Selektivität.

Es ist vorgesehen, dass die Arbeiten planmäßig bis März 2018 im Rahmen eines industriellen Forschungsvorhabens fortgesetzt werden. Ziel ist hierbei, weitere wichtige Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der Methodik im Feldeinsatz sowie erste Korrelationen der Messergebnisse mit den aus einem Alterungsdatenbanksystem eines vorangehenden Industrieprojekts stammenden physikalischen Parametern zu erhalten.

Somit wäre ein Meilenstein bei der Entwicklung eines ortsauflösenden Diagnosesystems, das eine physikalisch orientierte und fundierte Zustandsbewertung einzelner Abschnitte von Energieversorgungsnetzen ermöglicht und somit wichtige Eingangsgrößen für eine selektive und kostenoptimierte Instandhaltungsplanung zur Verfügung stellt, erreicht.

4 Hybride Netzarchitekturen unter Berücksichtigung des regenerativen Energiedargebots

4.1 Übersicht

Die Arbeiten im Teilprojekt „Modularer Multilevelumrichter für Batteriespeicheranwendungen“ haben im Juni 2012 begonnen, die für das Teilprojekt „Hybrides Verteilnetz“ im Juli 2013. Beide Themen sind jeweils durch eine Vollzeit-Arbeitskraft besetzt und werden in Zusammenarbeit mit der Division Energy Management der Siemens AG in Erlangen durchgeführt.

4.2 Modularer Multilevel-Umrichter für Batteriespeicheranwendungen

Energiespeicher stellen einen integralen Bestandteil in den diskutierten zukünftigen Architekturen der Verteilnetze dar. Gegenwärtig existieren bereits Lösungen für Energiespeicher für Mittelspannungsnetze basierend auf Li-Ionen-Batterien. Bei diesen Lösungen erfolgt – aufgrund der physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Batterien – eine Skalierung der abrufbaren Leistung an den Klemmen des Energiespeichersystems durch Parallelschaltung von Umrichter und Batterie, d.h. die Leistung an den Systemklemmen wird über den Strom skaliert. Durch einen Einsatz neuartiger, modularer Multilevel-Umrichter kann die Leistung an den Systemklemmen über die Spannung skaliert werden, indem eine Integration der Li-Ionen-Batterien in die Module des Umrichters erfolgt. Die Integration von Li-Ionen-Batterien erfolgt über einen zusätzlichen DC/DC-Steller.

Ein Muster eines Modulare Multilevel-Umrichters befindet sich in einem Labor des Drittmittelgebers. Dieses Labormuster konnte im Rahmen des Forschungsprojekts bereits in Betrieb genommen werden und Simulationsergebnisse konnten anhand von Messungen verifiziert werden. Eine Besonderheit bei der Integration von Batterien in den Modulare Multilevel-Umrichter ist die asymmetrische Bestückung der Umrichtermodule mit Batterien.

Die Regelung eines Modulare Multilevel-Umrichters besteht typischerweise aus einer kaskadenförmigen Regelkreisstruktur mit einem unterlagerten Stromregelkreis und einem überlagerten Regelkreis zur Energiebalancierung. Durch die Integration von Batterien entstehen neue Herausforderungen an die Umrichterregelung. Die unterlagerte Stromregelung wurde bisher durch meh-

rere klassische einschleifige Regelkreise realisiert. Zur Verbesserung der Regelgüte wurden moderne Methoden der Regelungstechnik in der Simulation getestet und schließlich implementiert. Dazu wurde zunächst eine Optimale Regelung im Zustandsraum und anschließend eine modellbasierte, prädiktive Regelung in der Simulation untersucht und am Versuchsaufbau getestet. Erstmals konnte der stabile Betrieb einer modellbasierten, prädiktiven Regelung an einem Versuchsaufbau des Modulare Multilevel-Umrichters nachgewiesen werden. Basierend auf der optimierten unterlagerten Stromregelung wurde die überlagerte Regelung zur Energiebalancierung verbessert. Dazu wurden eigens zur Batterieintegration neue Verfahren zur Energiebalancierung entwickelt und erfolgreich getestet.

Zusammenfassend wurde ein modulares Batteriespeichersystem basierend auf dem Modulare Multilevel-Umrichter entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Batteriespeichersystem beliebig in Leistung und Energie skaliert werden, wodurch neue Freiheitsgrade in der Dimensionierung von Batteriespeichersystemen entstehen. Durch den Einsatz von modernen regelungstechnischen Methoden lässt sich ein stabiler, hochperformanter Betrieb des Gesamtsystems garantieren.

4.3 Hybrides Verteilnetz

Die bisherige Anschlusspraxis von Erneuerbaren Energien (EE) ist unzureichend und führt zu immer größeren Problemen im elektrischen Energieversorgungsnetz. Zwei wesentliche Aspekte kennzeichnen diese Problematik:

- zeitlich fluktuierende Einspeisung
- für das Netz zufällig verteilte Anschlusspunkte

Bisher ist kein ganzheitlicher Lösungsansatz für das oben genannte Problem bekannt. Meist werden nur Teilaspekte gelöst oder eher die Symptome als die Ursachen behoben.

Im Rahmen des Teilprojekts Hybrides Verteilnetz werden neuartige Anschlusskonzepte für EE untersucht, die die oben genannten Probleme ganzheitlich adressieren und deshalb eine nachhaltige Integration von EE ermöglichen. Der Netzausbau wird im Vergleich zu den bisherigen Lösungsmethoden deutlich reduziert, die Einbindung der EE in die Systemführung wird erleichtert und die Versorgungsqualität bleibt im gewohnten Maße erhalten. Das entwickelte Anschlusskonzept trägt entscheidend zum Ersatz konventioneller Kraftwerke bei.

Die Bearbeitung des Projekts gliederte sich in folgende Punkte:

- AP1: Analyse der gegenwärtigen Struktur und Funktionsweise der elektrischen Energieversorgung und der damit verbundenen Probleme bei der Einbindung von regenerativen Erzeugungsanlagen
- AP2: Festlegung und konzeptionelle Untersuchung geeigneter Anschlusskonzepte zur netzverträglichen Integration von EE
- AP3: Entwicklung von Betriebsführungsstrategien für das entwickelte Gesamtsystem aus EE und Energiespeichern
- AP4: Dimensionierung der benötigten Komponenten, insbesondere Art und Größe der benötigten Energiespeicher
- AP5: Aufbau der Gesamtarchitektur in einer Simulation und Untersuchung des Betriebsverhaltens
- AP6: Validierung der Simulationsergebnisse anhand eines Versuchsaufbaus beim Projektpartner

Die beiden Teilprojekte „Modularer Multilevel-Umrichter für Batteriespeicheranwendungen“ und „hybrides Verteilnetz“ wurden im Jahr 2016 durch einen gemeinsamen Versuchsaufbau zusammengeführt. Dadurch ergibt sich ein Gesamtsystem, an dem zentrale Fragestellungen und Probleme der Energiewende untersucht und gelöst werden können.

5 Oberschwingungsreduktion

5.1 Zusammenfassung der erfolgten Arbeiten und Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der Einspeisung weiter steigender Anteile dezentral und regenerativ erzeugten Stromes soll die Stabilität und Energieeffizienz in den Verteilnetzen durch Leistungselektronik und geeignete Steuerverfahren nachhaltig gesichert werden. Dazu ist es notwendig, die Spannung dezentral zu stabilisieren und gleichzeitig Oberschwingungen und Blindleistung so zu optimieren, dass auch die Übertragungsverluste verringert werden. Oberschwingungsströme, die maßgeblich durch sehr weit verbreitete Schaltnetzteile mit einfachen Brückengleichrichtern entstehen, verursachen bereits erhebliche Verluste in Transformatoren, Leitungen und anderen Netzbetriebsmitteln, so dass diese Problematik auch von den Betreibern der Verteilnetze erkannt wurden und Gegenmaßnahmen zu treffen sind.

Im Teilprojekt wurden zunächst Ursachen von Oberschwingungen, deren Entstehung und Ausbreitung untersucht. Dazu wurden entsprechende Rechnersimulationen durchgeführt, so dass Oberschwingungsströme anhand der Schaltungstopologie nachgebildet werden konnten. Durch Signalanalyse konnten die Amplituden und Phasenverschiebungen der Oberschwingungsströme gewonnen werden. Zur Erzeugung realistischer Bedingungen im Labor wurden dann mit diesen Ergebnissen dreiphasige Stromrichter entwickelt, die durch Synthese der Oberschwingungswerte reale Ströme erzeugen konnten, um nahezu beliebige Oberschwingungsströme im Labor in realer Größe nachzubilden.

Durch weitere Stromrichter und Nachbildungen von Netzimpedanzen konnten diese Oberschwingungen im Laborversuch kompensiert werden. Da Oberschwingungen unterschiedlicher Ordnungen Mit-, Gegen- oder Nullsysteme bilden, wurden Stromrichtertopologien auf deren Eignung dafür untersucht. Insbesondere die Bildung sog. Nullsysteme, bei denen die 3 Leiterströme gleichphasig fließen, erfordern eine weitere Steuermöglichkeit und ein entsprechende Modulationsverfahren für die Stromrichter. Im Projekt wurden 4 Leiter Topologien von Stromrichtern in 2-Punkt oder 3 Punkt Verfahren mit erhöhten Zwischenkreisspannungen untersucht.

Im Betrieb von Netzen stellte sich heraus, dass insbesondere Oberschwingungen mit den Ordnungszahlen bis 19 sich über weite Entfernungen in den Netzen ausbreiten, während höhere Frequenzen aufgrund von Kapazitäten der Betriebsmittel nur lokale Bedeutung haben und geringere Leistungen besitzen. Es wurden deshalb auch neue, besonders schnell schaltende Leistungshalbleiter aus SiC und GaN untersucht, um auch Oberschwingungsströme bis zur 49. Ordnung erzeugen zu können.

Für die unabhängige Regelung der Oberschwingungsströme stellte sich heraus, dass bei dreiphasigen Systemen pro Oberschwingung 3 Regler erforderlich sind, die in Echtzeit, d.h. etwa im Bereich von 100 μ s periodisch berechnet werden müssen. Es wurden deshalb schnelle DSP Baugruppen zur Steuerung und Regelung der Stromrichter eingesetzt, deren Rechengeschwindigkeit sich jedoch aufgrund der Vielzahl an Algorithmen als äußerst kritisch herausgestellt hat. Es wurden deshalb hochperformante Implementierungen von Parallel-Resonanten Reglern entwickelt, die dann den Betrieb von über 30 Reglern in Echtzeit erlaubten. Eingesetzt wurde auch eine Steuerungsvariante mit einem zusätzlichen „high performance“ DSP, der über Matlab/Simulink mit Rechenmodellen programmiert werden kann. Damit wurde eine weitere Leistungssteigerung erreicht, die insbesondere für schnellschaltende Leistungsbaulemente und damit mögliche hohe Schaltfrequenzen relevant ist.

Zukünftige DSP Bauelemente werden voraussichtlich höhere Taktfrequenzen und Performance (z.B. Dual Core DSPs) bieten, so dass damit die Algorithmen bzw. die Anzahl der beeinflussbaren Oberschwingungen erweitert werden können. Auf dem Gebiet der Regelungstechnik wurde auch eine Zusammenarbeit mit Prof. Grahame Holmes, RMIT Melbourne begonnen, der weltweit anerkannter Experte für derartige Algorithmen ist.

Zur Erhöhung der Dynamik und Leistungsfähigkeit wurden interleaved parallel synchronisierte Stromrichter untersucht. Diese Variante ermöglicht die besonders exakte Steuerung der Oberschwingungsströme bei hoher Signalqualität bei gleichzeitiger Einsparung von Kopplungsinduktivitäten. Aufgrund der höheren Anzahl an Schaltzuständen können jedoch auch unerwünschte Ausgleichsströme zwischen den Teilstromrichtern entstehen, die auch Gleichanteile enthalten können, die in elektrischen Netzen nicht akzeptabel sind. Daher werden weitere Regler benötigt, die in die Steuerungssoftware implementiert wurden, so dass der Betrieb dieser Stromrichtertopolgie alle Anforderungen des Netzbetriebs erfüllen konnte.

Im Rahmen weiterer Forschungsprojekte wurden auf Basis dieser Erkenntnisse mit Industriepartnern neue Stromrichter im Leistungsbereich von 50 kVA (double conversion) oder 100 kVA (single conversion) entwickelt, die auch die Kriterien für die Betriebssicherheit erfüllen, so dass damit ein Pilotbetrieb in einem öffentlichen Verteilnetz bei infra in Fürth möglich ist.

Das Forschungsprojekt „Intellibat“ (gefördert durch BMBF) beschäftigt sich mit einer innovativen Ladetechnik für Lithium Akkumodule. Im Rahmen der dort entwickelten netzgekoppelten Stromrichter zur Ladung / Entladung der Batteriemodule konnten realistische Anforderungen für die Oberschwingungskompensation und Netzqualität abgeleitet werden. Umgekehrt konnten Betriebsweisen der Oberschwingungskompensation im Zusammenhang mit dem vorrangigen Betrieb der Batteriespeicher untersucht werden.

Zur Auswertung der Betriebsdaten und zur Bedienung der Stromrichteranlagen wurden Softwaremodule zur objektorientierten Datenübertragung zu einem PC erstellt. Die Funktionalität beinhaltet auch graphische Module, wie z.B. eine in die DSP Steuerung integrierte Oszilloskop-Klasse und eine Oberschwingungsanalyse. Dadurch war es möglich, die Versuchsbedingungen exakt zu überprüfen und zu dokumentieren.

In einem weiterem Forschungsprojekt KOSYNET werden die Ergebnisse verwendet, um dort eine verteiltes Kompensationssystem zu realisieren.

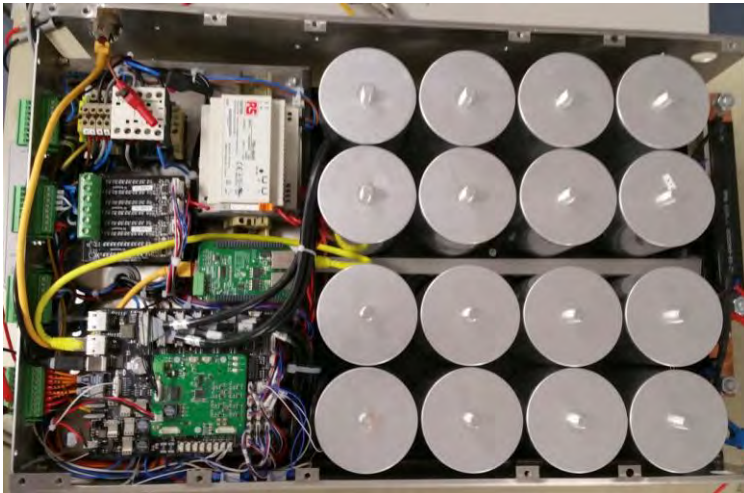


Abbildung 61: Power Converter für Interleaved Synchronbetrieb

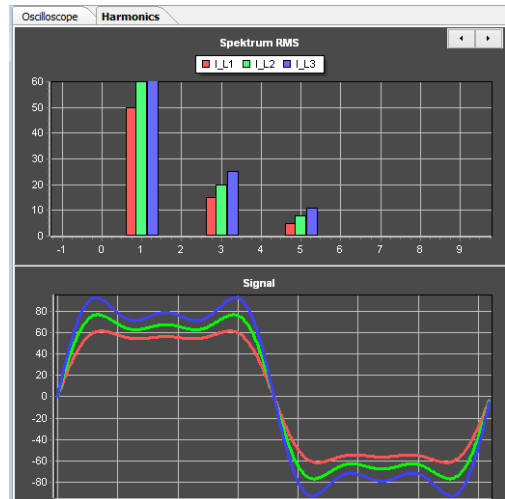


Abbildung 62: Oberschwingungsvorgabe für dreiphasige Stromrichtersysteme und Signalsynthese

6 Schnittstellen zwischen stationären Energieversorgungsnetzen und mobilen Verbrauchern

6.1 Erforschung, Entwicklung und Aufbau eines induktiven Ladesystems (IISB)

Eine zentrale Komponente des induktiven Energieübertragungssystems ist das Spulensystem. Dieses hat aufgrund der magnetischen Kopplung und den Verlusten in den Spulen einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Daher wurde zu Beginn des Projekts ein besonderes Augenmerk auf die Auswahl einer geeigneten Spulengeometrie und -anordnung gelegt, die zum einen eine hohe Spulenpositionstoleranz, aber auch eine hohe Leistungsdichte ermöglicht. Aufgrund der relativ hohen Arbeitsfrequenz im Bereich von 140kHz werden zur Verringerung der Wicklungsverluste Hochfrequenzlitzen verwendet. Um die Systemverluste weiter zu verringern und das induktive Laden auch im Hinblick auf Systemkosten und -effizienz gegenüber kabelgebundenen Systemen konkurrenzfähig zu machen, waren Ansätze erforderlich, die eine Optimierung der Hochfrequenzlitzen ermöglichen, den frequenzabhängigen Wicklungswiderstand weiter reduzieren und somit ein hohes Einspar-/Verbesserungspotenzial für das Gesamtsystem bieten. Hierfür wurde ein neuartiger Ansatz erarbeitet, simuliert und getestet, der FEM (Finite-Elemente-Methode)-Ergebnisse mit analytischen Ansätzen kombiniert. Das Grundprinzip beruht darauf, dass sich das magnetische Feld eines Litzenleiters und eines Volldrahts nicht unterscheidet, wenn der Strom gleichmäßig verteilt ist. Darauf basierend wird das magnetische Feld entlang der Wicklung bestimmt, um anschließend die frequenzabhängigen Skin- und Proximity-Verluste zu berechnen. Mit dieser Methodik konnte ein für die Anordnung optimales Spulensystem entworfen und aufgebaut werden.



Abbildung 63: Leistungsteile und Übertragungssystem des induktiven Ladesystems

Grundlage der Energieübertragung bildet die Erzeugung eines Wechselfeldes zwischen den koppelnden Spulen. Primärseitig stellt ein Inverter eine hochfrequente Wechselspannung zur Verfügung, die auf der Sekundärseite eine Wechselspannung induziert.

Für einen effizienten Betrieb wird ein resonant arbeitender Konverter verwendet. Die Auswahl eines geeigneten Steuer- und Regelverfahrens hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb und die Effizienz des Gesamtsystems. Bisher wurden in resonanten Converttern vorrangig Frequenzregel- oder Phase-Shift-Verfahren verwendet. Nachteil des Ersteren ist ein breites resultierendes Frequenzband aufgrund der Anpassung an die schwankende Kopplung. Zwar bietet das Phase-Shift-Verfahren die Möglichkeit bei einer festen Frequenz zu arbeiten, doch hat es den schwerwiegenden Nachteil, dass nicht in jedem Arbeitspunkt ein weiches Schalten der Leistungshalbleiter sichergestellt werden kann. Daher wurde ein erweitertes Phase-Shift-Regelverfahren entwickelt und getestet.

Der sichere Betrieb des induktiven Ladesystems stand im Hinblick auf eine spätere Anwendung im Mittelpunkt der Forschung. Ein wesentliches Kriterium hierfür ist zum einen die Regelung und Steuerung des primärseitigen Wechselrichters in der Ladestation und zum anderen die Erfassung der elektrischen Parameter und Betriebszustände auf der Fahrzeugseite. Auf der stationären Seite wurde daher eine kontinuierliche Messung der Phasenlage zwischen Strom und Spannung, sowie der Amplitudenwerte und der Stromanstiegsgeschwindigkeit entwickelt. Aufbauend auf den ausführlichen Arbeiten zur Regelung und Steuerung des Resonanzwandlers (Wechselrichter) innerhalb des induktiven Energieübertragungssystems wurden Untersuchungen zu einem ausgangsseitigen Spannungswandler (DC/DC-Wandler) für eine optimale Anpassung durchgeführt. Dabei wurde im DC/DC-Wandler neben verschiedenen Sicherheitsfunktionen, wie einer Überstrom- und Überspannungsdetektion, eine Impedanzregelung implementiert und getestet.

Neben den angeführten Optimierungsschritten einzelner Komponenten wurde die mechatronische Integration des sekundärseitigen Spulensystems (Pick-Up) inklusive der Leistungselektronik konstruktiv umgesetzt, sodass es zum Projektende in das Forschungsfahrzeug eingebaut werden konnte (siehe Abbildung 64). Für das Gesamtsystem konnten Wirkungsgrade über 92% (vom Netz zur Batterie) über den gesamten Betriebsbereich erreicht werden. Die Batteriespannung wurde dabei ausgehend von realen Zellmessungen im Bereich von 320 V bis 400 V variiert und die Ladeleistung auf 3,5 kW geregelt.



Abbildung 64: Funktionsdemonstrator des induktiven Ladesystems am Testfahrzeug

6.2 Drahtlose Kommunikation (LTE)

Das Ziel des Arbeitspakets war es, eine bidirektionale und störereichere Kommunikationsschnittstelle zwischen Primär- und Sekundärseite des induktiven Leistungsübertragungssystems zu entwickeln. Der Lösungsansatz versucht möglichst viele Synergien zur bereits vorhandenen Leistungsübertragung zu nutzen. Als drahtloses Übertragungsmedium wird daher das induktiv gekoppelte Spulenpaar der Leistungsübertragung verwendet. Das bei 130 kHz rechteckig schaltende Leistungsübertragungssignal erzeugt sehr starke Oberwellen im Kilowatt-Bereich. Deshalb ist das Frequenzband oberhalb dieser Schaltfrequenz für die Datenübertragung ungeeignet. Im Bereich unterhalb der Leistungsübertragung treten diese Störungen nicht auf. Das Modul sendet daher unterhalb im Frequenzband von 7-9 kHz. In diesem ist es möglich, ein Kommunikationssystem mit niedrigen Bitfehlerraten zu realisieren.

Die für das Kommunikationssystem entwickelten Schaltungen werden parallel zur Leistungsübertragung angeschlossen. Durch diese Architektur können die Module einfach in bestehende Leistungsübertragungssysteme nachträglich integriert werden. Der Aufbau der Module ist für Primär- und Sekundärseite identisch. Ein Kommunikationsmodul besteht jeweils aus einer Frequenzweiche, die neben der Filterwirkung auch zur galvanischen Trennung des analogen und digitalen Schaltungsteils dient, und direkt an die Leistungsspulen angeschlossen wird. Dabei kann jeweils zwischen Sende- und Empfangspfad umgeschaltet werden, um

eine bidirektionale Kommunikation zu ermöglichen. Der Sendepfad besteht aus einem passiven Filter sowie einem Leistungsverstärker, der das vom Mikrocontroller erzeugte HF Signal verstärkt. Im Empfangspfad folgt auf die Frequenzweiche ein aktiver Filter sowie ein Verstärker.



Abbildung 65: Entwickeltes Sende-/Empfangsmodul (65mm x 45mm)

Eine große Herausforderung bei der Auslegung der Filter lag in den großen Unterschieden in den Sendeleistungen. Die Leistungsübertragung ist für einen Normbetrieb von über 3 kW ausgelegt. Im Gegensatz dazu sendet das Kommunikationsmodul mit einer Spitzenleistung von 85 mW. Eine hohe Filterdämpfung und gute Isolation vom Leistungsteil ist somit unabdinglich.

Zur Datenübertragung werden digitale Modulationsverfahren verwendet. Für den Demonstrator wurde die sehr störsichere BPSK Modulation ausgewählt. Die modulierten Daten werden auf eine Trägerfrequenz von 8 kHz hochgemischt und mit einer Symbolrate von 1 kS/s ergibt sich eine Signalbandbreite des HF Signals von 1 kHz. Die digitale Signalverarbeitung ist auf einem Mikrocontroller mit integrierten ADC/DAC implementiert. Dadurch lässt sich das Sendesignal direkt erzeugen, und im Empfänger das HF Signal nach der Filterstufe digitalisieren. Aufgrund der digitalen Realisierung können diese Parameter per Firmware Update angepasst werden.

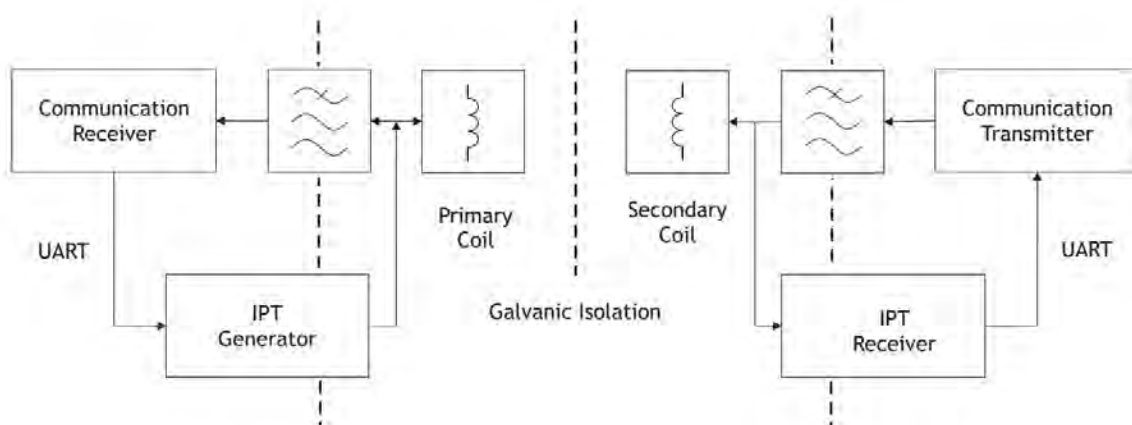


Abbildung 66: Gesamtes Leistungsübertragungssystem mit integriertem Datenlink zur Leistungsregelung.

Abbildung 65 zeigt das fertige Sende-/Empfangsmodul. Mit diesen kann ein bidirektionaler Datenlink bei gleichzeitiger Leistungsübertragung aufgebaut werden. Als Kennwert für die Qualität der Datenübertragung dient das sog. Signal-Rausch-Verhältnis. Bei einem Kopplungsfaktor der Energiespulen von 0,4 beträgt dieses 31 dB bei gleichzeitiger Leistungsübertragung von 3 kW. Dies ermöglicht eine robuste Kommunikation mit einer Bitfehlerrate kleiner 10^{-10} .

Die Kommunikationsmodule wurden, wie in Abbildung 66 zu sehen, mit der Leistungsübertragung zu einem Gesamtsystem integriert. In diesem wird der Datenlink verwendet, um eine Kommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite herzustellen. Dabei werden Messdaten (u.a. aktuelle Spannungs- und Stromwerte) der Sekundärseite an die Primärseite übertragen. Diese werden zur Regelung der induktiven Leistungsübertragung verwendet.

7 Elektrische Energiespeicher im Netz

Der Aufbau einer intelligenten Speicherstation stellte eine große Herausforderung dar. Durch die Möglichkeit zur Verwendung verschiedener Speicherarten (Hochenergie- und Hochleistungsakkumulatoren, Superkondensatoren) sind anspruchsvolle Algorithmen zur Steuerung und der Kontrolle des Energiespeichers notwendig. Die Zustandsbestimmung des Lade- und Alterungszustandes der Speichereinheiten wird zusätzlich erschwert durch den Einsatz von Akkumulatorzellen, die unterschiedliche Zellchemie aufweisen (Kathoden mit LCO, NCA, LMO, NMC, oder LFP, in Kombination mit Anoden mit Graphit oder LTO) und eventuell durch vorherige Nutzung bereits Alterungserscheinungen zeigen. Die thermische Auslegung und das Thermomanagement des Speichersystems spielen eine wesentliche Rolle für effiziente Nutzung und möglichst geringe Alterung des Batteriespeichers. Zusätzlich erfordert ein sicherer Betrieb bei langjährigem Einsatz einen hohen Aufwand zur Absicherung des Batteriemangement-systems (BMS) gegen eventuelle Fehlverhalten und Umwelteinflüsse. Für das BMS wurde ein eingebettetes System entworfen, das die Steuer- und Regelaufgaben sicher und zuverlässig ausführt.

Im Projekt wurden ein Energiespeicher aus vier Teilspeichern mit jeweils 20kWh modular aufgebaut. Dabei konnten neue Konzepte im Bereich Sicherheit (z.B. Antifuse), im Bereich Business-Modell (z.B. foxBMS) und Technologien (z.B. Distributed BMS) evaluiert und umgesetzt werden.

7.1 Evaluierung und Auswahl der Komponenten

Die Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren für die intelligente Speicherstation stellt sich als am besten geeignet heraus, da sie in Bezug auf Leistungs- und Energiedichte eine gute Performanz zeigen und auch in Zukunft noch Steigerungspotential in Bezug auf diese Kennwerte bieten. Zusätzliche Kostensenkungen durch Massenfertigung sind auch heute noch zu erwarten. Im Rahmen der Forschungsarbeiten sind unterschiedliche Zellchemien der Lithium-Ionen-Akkumulatoren evaluiert und bewertet worden. Durch ihre hohe Zyklenstabilität und Langlebigkeit erweisen sich Zellen auf Basis von Lithium-Titanat (LTO) als für stationäre Anwendungen besonders geeignet. Ebenso ist eine Entscheidung für unterschiedliche Zellenformen („Pouch“-Zellen, zylindrische oder prismatische Zellenform) getroffen worden. Eine prismatische Zellform ermöglicht hier eine mechanische Konstruktion mit optimierter Kühlung und hoher Integrationsdichte.

Für die Auswahl der eingesetzten Komponenten spielt die Sicherheit und Zuverlässigkeit eine entscheidende Rolle. So muss aufgrund der Auslegung als Inselnetz mit galvanischer Trennung kontinuierlich die Isolation überwacht werden. Des Weiteren müssen im Batteriesystem verbaute Sicherheitskomponenten wie beispielsweise Sicherungen und Schaltelemente für Gleichstrom geeignet sein. Für das BMS wird ein redundanter Aufbau mit zwei physikalisch getrennten Mikrocontrollern eingesetzt, um verschiedene Fehlerfälle bei der Zellspannungs- und Zelltemperaturmessung abzufangen und die Messungen zu plausibilisieren.

7.2 Thermische Auslegung und mechanische Konstruktion

Die Temperierung der Lithium-Ionen-Batteriezellen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Zellen und auf ihre Alterung. Es wurden Methoden entwickelt, um die thermische Auslegung der Batteriemodule und des Gesamtsystems durchgängig effizient durchzuführen. Für die Messungen an den unterschiedlichen Akkumulatorzellen wurden Anregungsprofile erarbeitet und Messaufbauten entwickelt, die eine Parametrierung der elektrischen und thermischen Modelle in kurzer Zeit ermöglichen. Für die elektrothermisch gekoppelte Simulation wurde eine mathematische Methode (Model Order Reduction) angewandt, die es zulässt, komplette Batteriemodule und -packs unter elektrischer Belastung in kurzer Zeit zu simulieren. Hierdurch ist es möglich, mehrere Iterationen im mechanischen Designprozess durchzuführen und die benötigte Kühlstrategie zu bewerten. Auf Basis der Entscheidung für ein ausgewähltes Kühlkonzept wurde die intelligente Speicherstation konstruiert und die mechanischen Teile gefertigt.

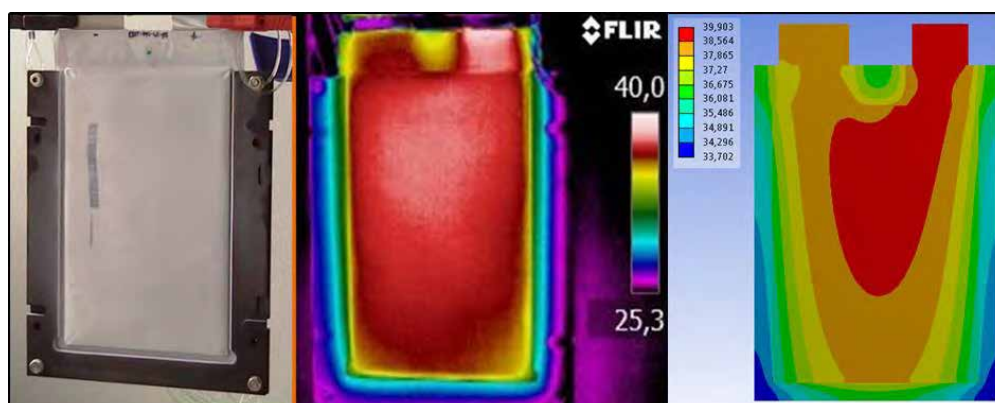


Abbildung 67: Vergleich zwischen einem Experiment mit Thermografieaufnahmen und der gekoppelt elektrothermischen Simulation

Wie bereits einleitend erwähnt, ist die elektrothermische Modellierung und Simulation ein essentieller Bestandteil des Entwicklungsprozesses, da die Temperatur maßgeblich für Sicherheit und Alterung der Batteriezellen im Betrieb ist. Außerdem ist eine zuverlässige Zustandserkennung und -prognose nur mit guter Kenntnis der thermischen Parameter möglich, da die Kennwerte von Batteriezellen aufgrund ihrer elektrochemischen Natur stark temperaturabhängig sind. Für den thermischen Designprozess wird eine Methode zur Verringerung der Ordnung des elektrothermischen Modells angewandt, welche die Simulationszeiten drastisch (Verhältnis 1:1600) reduziert und somit den Entwicklungsprozess beschleunigt und verbessert. Abbildung 67 vergleicht das Experiment mit der angewandten Reduzierungsmethode.

Fraunhofer IISE

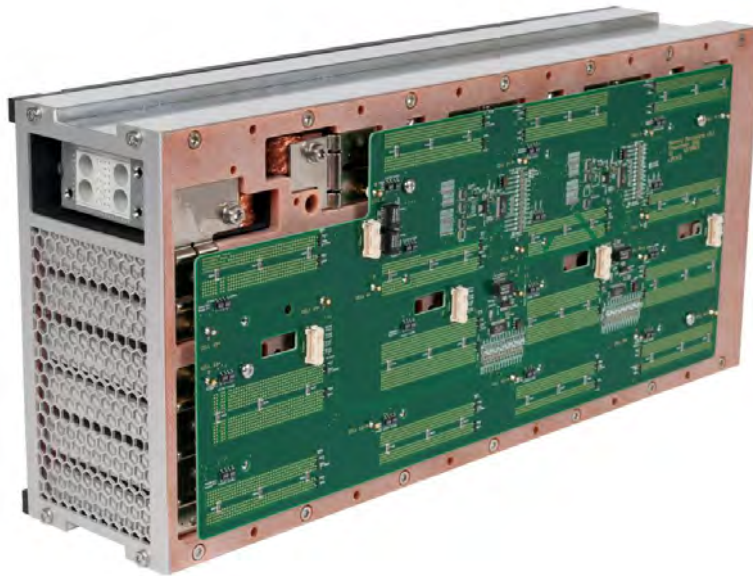


Abbildung 68: Erster Prototypaufbau eines 4-Zellen Batteriemoduls mit dezentraler modularer Batterieüberwachung und integriertem Thermomanagement

Die ermittelten thermischen Designanforderungen fließen anschließend auf Basis der Zellgeometrie und der Bauraumanforderungen in eine mechanische Konstruktion ein. Für die intelligente Speicherstation fiel die Entscheidung für eine Kühlung durch erzwungene Konvektion mit Umgebungsluft. Ein entwickeltes Modul für die Speicherstation ist auf Abbildung 68 zu sehen.

7.3 Kommunikation mit der Überwachungselektronik

Auf Basis von Vorentwicklungen wurde die Überwachungselektronik für die Batteriemodule entworfen. Es wurde ein Master-Slave-Konzept gewählt, in dem die Intelligenz in Form der Batteriemangementsoftware im zentralen Steuergerät konzentriert wird und die Kommunikation zu den Überwachungselektroniken robust gestaltet wird. Hierdurch verringert sich der Entwicklungsaufwand erheblich und Fehlerquellen werden minimiert. Die elektrische Sicherheit im Hinblick auf Kurzschluss und Überstrom wird durch entsprechende für Gleichstrom geeignete Komponenten gewährleistet.

Das vom Fraunhofer IISB neuentwickelte Konzept basiert auf einer dezentralen Batteriezellelektronik: jede Batteriezelle beinhaltet die benötigte Elektronik um sich selbst zu überwachen und die Daten über einen kapazitiv gekoppelten Bus an ein zentrales Batteriemangement zu übertragen. Vorteile dieses neuen Konzepts sind unter anderem die bereits integrierte Überwachungselektronik, die Integration der Zellsymmetrierung und des Thermomanagements und ein verminderter Kontaktierungsaufwand. Die Flexibilität und die Modularität beim Modulaufbau werden hierdurch erheblich verbessert. Ein Prototyp konnte erfolgreich die Machbarkeit dieses Konzepts demonstrieren. Abbildung 69 zeigt ein Batteriemodul mit dem entwickelten Konzept.

7.4 Sicherstellung der Sicherheit von Personen und der Batterie

Bei einem Dauereinsatz der intelligenten Speicherstation, wie er zum Beispiel bei der Nutzung als Zwischenspeicher für regenerativ erzeugte Energie vorliegt, stehen die Sicherheit, die Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit an oberster Stelle. Deshalb wurde das redundante Master-Slave-Konzept so konzipiert, dass es ermöglicht, auch im Fall eines Versagens eines Teils der Messelektronik noch sicher zu messen und im Notfall einen sicheren Zustand zu erreichen. Durch die Nutzung eines zweiten Mikrocontrollers ist es auch möglich, in der Entwicklung befindliche Regelstrategien und Algorithmen mit geringem Risiko zu testen. Ein durchgängig redundanter Aufbau der Elektrik, bspw. die allpolige Trennung mit zwangsgeführter Rücklesemöglichkeit des Zustandes

des Trennelements im Schütz, ist natürlich ebenso Voraussetzung für einen sicheren Betrieb des Batteriesystems wie die kontinuierliche Isolationsüberwachung.

Ein neues Bauelement zum Überbrücken defekter leistungselektronischer Komponenten wurde entwickelt und eine Reihe von Erfindungsmeldungen eingereicht. Dieses Überbrückungselement kann innerhalb weniger Millisekunden einen niederohmigen Kurzschluss (d.h. kleiner als $20\mu\Omega$ bei 1cm^2 aktiver Fläche) erzeugen und eröffnet somit einen Stromweg vorbei an defekten Batteriezellen oder allgemein Bauelementen. Dies wird durch einen internen Zündmechanismus ausgelöst. Insbesondere ist dies für Reihenschaltungen einer Vielzahl von Hochstromelementen wichtig, wie sie in dem Lithium-Ionen-Batteriespeicher der intelligenten Speicherstation auftreten. Hiermit wird einem Totalausfall des Systems vorgebeugt und somit die Verfügbarkeit und die Robustheit wesentlich erhöht. Abbildung 70 zeigt eine Zeichnung von dem Trennelement.



Abbildung 69: Erster Prototypaufbau eines 4-Zellen Batteriemoduls mit dezentraler modularer Batterieüberwachung und integriertem Thermomanagement



Abbildung 70: Zeichnung von einem Überbrückungselement

7.5 Software und Algorithmik zur Steuerung der Batterie

Die „Intelligenz“ der Speicherstation befindet sich im BMS. Dieses eingebettete System auf Basis zweier Mikrocontroller führt eine Software aus, die die komplette Überwachung, Steuerung und Regelung beinhaltet. Die Software ist einem Schichtenmodell nachempfunden (Hardware Abstraction Layer, Driver Abstraction Layer, Application Layer), wie auf Abbildung 71 gezeichnet. Zusätzlich zu dieser sogenannten vertikalen Abstraktion findet auch eine horizontale Teilung in zwei nebenläufige Task-Stränge statt, die sicherheitskritische von anwenderspezifischen Aufgaben trennt. Dies erhöht zusätzlich zu der physikalischen Auftrennung in zwei Mikrocontroller die Sicherheit und Zuverlässigkeit. Der Datenaustausch über diese Teilung hinweg und auch zwischen unterschiedlichen Software-Modulen ist mit einer Art eingebetteten Datenbank realisiert, die einen abgesicherten Zugriff auf Sensor- und Zustandsdaten ermöglicht und damit immer konsistente Daten bereitstellt. Von besonderer Wichtigkeit war bei den Forschungsarbeiten eine strikte Modularität der Software einzuhalten, um zukünftige Entwicklungen zu erleichtern.

Für die Entwicklungsarbeit ist es essentiell, neue Algorithmen, Sensorelemente und Sicherheitsmechanismen schnell und einfach in das BMS integrieren zu können. Daraus ergeben sich folgende Ziele, die bei der BMS-Neuentwicklung für die intelligente Speicherstation berücksichtigt wurden:

- *Flexibilität:* Im Falle von Änderungswünschen von Anwendern und Kunden sind sowohl die Hardware als auch die Software mit geringem Aufwand an diese anzupassen. Applikationsspezifische Lösungen sind für die vielseitigen, und oftmals sehr speziellen Anwendungsgebiete, von Vorteil.
- *Erweiterbarkeit:* Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind Gegenstand aktueller Forschung und unterliegen daher ständigen Weiterentwicklungen. Um in Zukunft auf diese Entwicklung effizienter reagieren zu können, ist es notwendig, dass sowohl Hardware, als auch Software erweiterbar gestaltet sind.

- *Benutzerfreundlichkeit:* Da das Feld der Entwickler von Batteriespeichern sehr vielschichtig ist, ist die Einstiegshürde für den Gebrauch und die Konfiguration des BMS niedrig zu halten und einen leichten Einstieg zu ermöglichen.

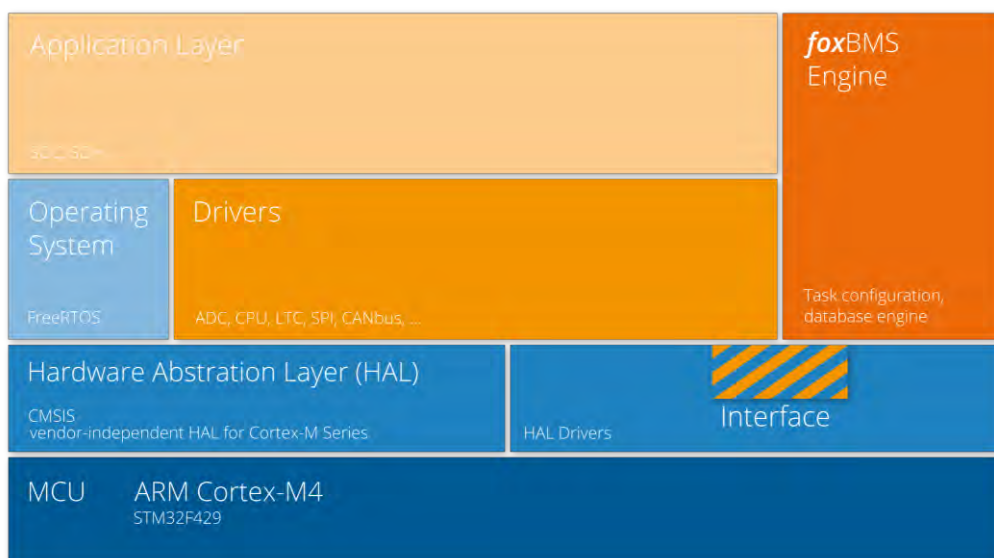


Abbildung 71: Beschreibung der Software-Schichtmodell von dem BMS

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte wurde ein neuartiges Konzept für ein BMS umgesetzt – foxBMS, free, open, flexible Battery Management System –, das im Folgenden detailliert beschrieben wird. Da ein Open Source Lizenzmodell verfolgt wurde, wurde stringent auf den Einsatz sowohl freier Software-Werkzeuge als auch freier Hardware (d.h. ohne Geheimhaltung erhältlich) während der Entwicklung geachtet.

BMS Hardware

Die Hardware des BMS ist unter Beachtung von zwei Hauptaspekten entwickelt worden. Zum einen muss sie ein breites Anwendungsspektrum ohne oder mit geringen Anpassungen abdecken, zum anderen muss sie die Möglichkeit bieten, neue Algorithmen und Betriebsstrategien mit geringem Risiko und Aufwand zu testen. Hierfür wurde ein zerlegbarer Aufbau gewählt, der aus bis zu vier Platinen besteht:

- BMS-Hauptplatine: beherbergt die "Intelligenz" des BMS und die essentiellen Schnittstellen
- BMS-Erweiterungsplatine: bietet zusätzliche Schnittstellen und Funktionalitäten
- BMS-FPGA-Platine: für hardware-unterstützte komplexe Algorithmenberechnung
- BMS-Schnittstellen-Platine: für eine applikationsspezifisch anpassbare Kommunikationsstelle zur Überwachungssensorik an den Batteriemodulen

Durch diesen modularen Ansatz ist es möglich die BMS-Entwicklung an die Anforderungen für die jeweilige intelligente Speicherstation zu adaptieren und schnell und einfach Neuentwicklungen zu integrieren.

BMS Software

Die BMS-Softwarestruktur für das eingebettete System kann, wie in Abbildung 72 ersichtlich, als ein Schichtenmodell beschrieben werden. Zur Abstraktion der Mikrocontrollerhardware von der angebundenen batteriemanagement-spezifischen Peripheriekomponenten dienen die beiden unteren Abstraktionsebenen. In einer oberen Ebene können applikationsspezifische, vom Kunden entwickelte Algorithmen parallel zu sicherheitskritischen Überwachungsalgorithmen ablaufen, um eine hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk wurde hier auf eine zentral eingebettete Datenbank gelegt, die den diversen Softwaremodulen Sensordaten über einfach zu benutzende Schnittstellen abgesichert zur Verfügung stellt. Diese Modularität ermöglicht es, die BMS-Software um weitere Funktionalität zu erweitern. Ebenso wurden die Softwaremodule konfigurierbar implementiert, so dass der Entwickler die BMS-Software auf einfache Weise nach seinen Wünschen einstellen kann. Hierfür wird ein eigenentwickeltes Framework bzw. eine graphische Nutzeroberfläche eingesetzt.

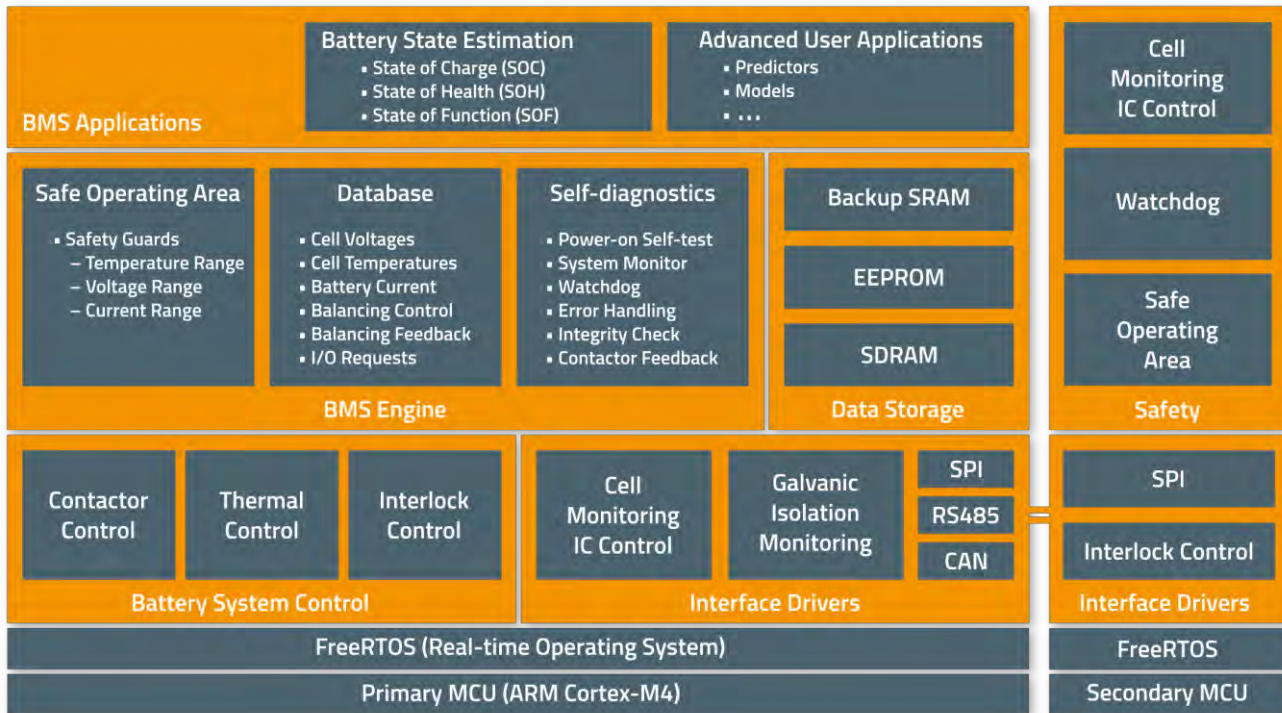


Abbildung 72: Beschreibung der Software-Organisation von foxBMS

Alle Entwicklungsdokumente sind offengelegt, dadurch ist eine Adaption durch die Anwender einfach möglich. Das BMS ist sowohl von hardware- als auch softwaretechnischer Seite modular entwickelt, um auf zukünftige Entwicklungen und Anforderungsänderungen flexibel und schnell reagieren zu können. Durch das Offenlegen der Entwicklungsdokumente wird eine Gemeinschaftsentwicklung angestrebt. Der Einsatz in einer intelligenten Speicherstation wurde in 3 Teilspeichern mit jeweils 20 kWh am Fraunhofer IISB erfolgreich demonstriert. Die Teilspeicher sind auf Abbildung 73 zu sehen.



Abbildung 73: drei Teilspeicher (jeweils 20 kWh) der intelligenten Speicherstation mit foxBMS

7.6 Ausblick

Im Teilprojekt intelligenter Speicherstation wurde ein Energiespeicher aus Teilspeichern modular aufgebaut. Neue Konzepte und Technologien konnten dabei evaluiert und umgesetzt werden und zeigten einen Beitrag zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses für Lithium-Ionen-Energiespeicher.

Durch die Integration der Energiespeicher in verschiedenen Anwendungsszenarien (Nutzung als Energiequelle für Motorenprüfstand bei Industriekunden, Integration in Gleichstromnetz im Fraunhofer IISB) wurde demonstriert, dass ein Dauerbetrieb des

Speichers für unterschiedliche Nutzungsszenarien möglich ist. Im Bereich der Batterie-Management-Software sticht diese Forschungsarbeit insofern heraus, dass sie zukünftig als Grundlage für weitere Projekte für Industrie und Forschung verwendet werden wird. Sie wird offengelegt für eine gemeinschaftliche Weiterentwicklung für eine freie und unabhängige Entwicklergemeinschaft, und stellt damit eine universelle und modulare BMS Forschungs- und Entwicklungsplattform dar.

8 Smart Grid Solar - Wirtschaftlich und technisch optimierte Integration regenerativer Energien

Die hohe Anzahl und Leistung dezentraler Erzeugungsanlagen kann vor allem in der Niederspannung zu Spannungserhöhungen sowie zu erhöhten Strombelastungen der Betriebsmittel führen. Um diese Auswirkungen zu reduzieren, wird seitens der Netzbetreiber in erster Linie auf konventionellen Netzausbau gesetzt. Allerdings wird in der Netzplanung auch zunehmend die Möglichkeit des Einsatzes steuerbarer Komponenten wie regelbare Ortsnetztransformatoren, Netzregler, PV-Wechselrichter oder auch Speicher in Betracht gezogen.

Die Untersuchungen innerhalb des Arbeitsprogramms Netze und Netzmanagement im Projekt Smart Grid Solar wurden in enger Zusammenarbeit mit dem ZAE Bayern durchgeführt und beschäftigen sich mit den Auswirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen (im Speziellen Photovoltaik-Anlagen) auf Niederspannungsnetze. Hierzu wurden zunächst 2 Netzgebiete ausgewählt, in denen ein Messdatenerfassungssystem aufgebaut wurde, der Ort Epplas (Hof) und der eher urbane Gegensatz Schlottenhof (Arzberg). Ziel des Projektes war die Modellierung und Analyse der Netze sowie die Untersuchung der Netzzvorgänge anhand der erfassten Messdaten. Dazu gehört die Analyse der PV-Einspeiseleistungen wie auch die Betrachtung deren Auswirkungen auf die Netze in Form der resultierenden Spannungen und Strombelastungen. Basierend auf diesen Untersuchungen sollen Leitlinien bzw. Empfehlungen zu Assetplanung und zu optimiertem Betrieb des Gesamtsystems abgeleitet werden. Neben klassischem Netzausbau steht hier vor allem der mögliche Einsatz intelligenter Betriebsmittel im Vordergrund.

8.1 Messdatenerfassung in den Netzgebieten

In den ausgewählten Niederspannungsnetzen Epplas (Hof) und Schlottenhof (Arzberg) wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Informationssysteme (iisys) der Hochschule Hof ein Datenerfassungssystem installiert. Zu diesem Zweck wurden Messgeräte an den Hausanschlüssen (Smart Meter LZQJ-XC der Firma EMH Metering) sowie an den Ortsnetztransformatoren (3-Phasen-Leistungsmessklemmen in Verbindung mit SPS-Controller PFC200 der Firma WAGO) verbaut, welche die Spannungen wie auch die Leistungsflüsse im Netz erfassen sollen. In den teilnehmenden Haushalten werden der Verbrauch, die Einspeiseleistung von PV-Anlagen wie auch die Haushaltsspeicher gemessen, um für jeden Haushalt einen vollständigen Datensatz zu erhalten. Ebenfalls werden Werte am Quartierspeicher in Epplas (Bleispeicher der Firma IBC Solar) sowie am Anschlusspunkt des Testzentrums in Arzberg (PV-Anlage, Elektrolyseur, Redox-Flow-Speicher) erfasst. Abbildung 74 zeigt die Verteilung aller Messpunkte in den Netzgebieten Epplas und Schlottenhof.

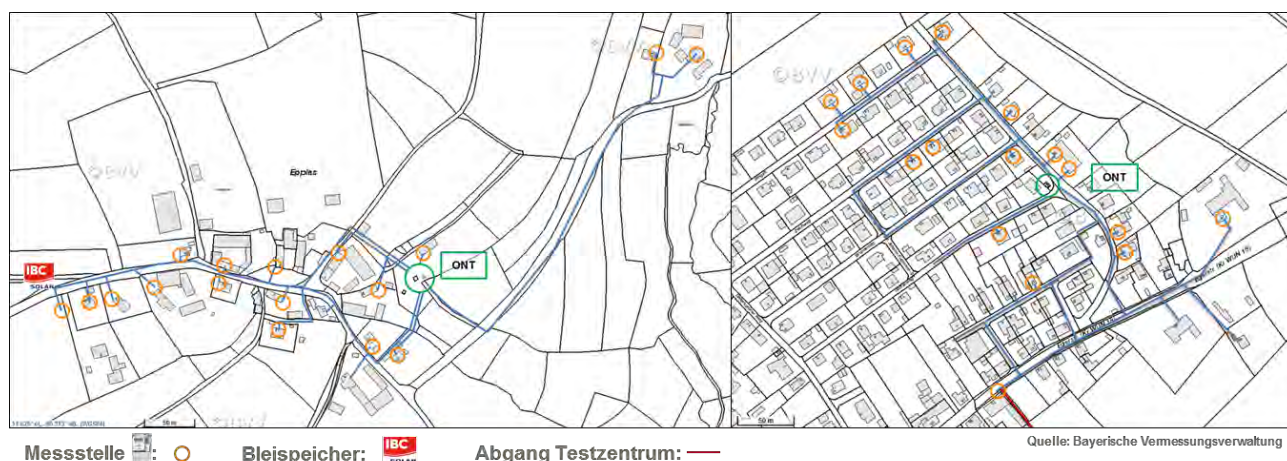


Abbildung 74: Messstellenverteilung und Speicherpositionierung im Niederspannungsnetz des ländlichen Ortes Epplas (links) und des urbanen Ortsteiles Schlottenhof (rechts) mit Abgang zu Testzentrum

Die Übertragung der Daten an den Server der Hochschule Hof erfolgt mittels Mobilfunk. Im Bereich Arzberg beschränkt man sich auf eine minutliche Erfassung, da hier seitens des Netzbetreibers eine Standard-Lösung in Form des EMH-Kommunikations-Steckmoduls VARIOMOD XC GPRS favorisiert wurde, welches jedoch technisch keine höhere Übertragungsrate erlaubt. In Epplas konnte mittels zusätzlicher Rechentechnik vor Ort eine höhere Übertragungsrate von 15 Sekunden realisiert werden.

Die Zeitsynchronität spielt vor allem bei einer Weiterverarbeitung der Daten mittels Netzzustandsschätzung eine wichtige Rolle. Hier kommt die verwendete Mess- und Übertragungstechnik in den Haushalten an gewisse Grenzen, welche aus der Smart-Meter-internen Daten-Verarbeitung (Verarbeitungszeit 500-1500 ms) und der Übertragung per Mobilfunk (durchschnittlich 1 s, abhängig von Netzabdeckung und -auslastung) resultieren. Letzteres ist in Epplas aufgrund der Datenpufferung durch die lokale Rechentechnik zunächst weniger relevant. Aus ersten Tests zu Datenerfassung und -übertragung der Hochschule Hof ergibt sich damit ein Zeitintervall von -1 s bis +1 s (Epplas) bzw. von -2,8 s bis +2,8 s (Schlottenhof) um den durch den Server vorgegebenen Soll-Messzeitpunkt. Mögliche negative Werte resultieren dabei aus Fehlern beim Stellen der geräteinternen Uhr, was ebenfalls von den Laufzeiten beeinflusst wird.

Basierend auf diesen ersten Betrachtungen wurden die Zeitstempel der Messdaten in beiden Netzgebieten näher untersucht. Es zeigt sich, dass die Zeitstempel an den EMH-Geräten sowohl in Epplas als auch in Schlottenhof meist nur geringe Abweichungen im Bereich von 0 bis 1 Sekunde vom Soll-Messzeitpunkt aufweisen. Vergleicht man die Zeitstempel der Geräte untereinander, so zeigt sich eine zeitlich eng beieinander liegende Datenaufnahme aller Messknoten in einem Intervall von meist 1 Sekunde, teils 2 Sekunden. In Arzberg ergeben sich durch die zusätzlichen Laufzeiten bei der Messdatenanfrage durch die GPRS-Verbindung höhere Abweichungen vom Soll-Messzeitpunkt, jedoch sind diese vernachlässigbar im Vergleich zum hier höheren Messintervall von 60 Sekunden. Durch die breitere Streuung der Zeitdifferenzen können sich jedoch höhere Fehler bei einer Zustandsschätzung ergeben, da die Synchronität der Messdatenaufnahme mit höherer Streuung zunehmend verloren geht.

Eine wichtige Frage stellt sich bei der Messdatenaufnahme bezüglich der Erfassbarkeit von Netzvorgängen bzw. von Veränderungen im Netzzustand durch Leistungssprünge an PV-Anlagen oder auch durch Schaltvorgänge auf übergeordneten Spannungsebenen. Erste Untersuchungen deuten bereits darauf hin, dass bei einer Messdatenaufnahme im Minutenbereich nicht alle Netzvorgänge erfasst werden können. Weitere Analysen bezüglich der Erfassbarkeit von Leistungssprüngen (und damit verbundenen Spannungsänderungen) sollen im Projekt anhand der Messdaten durchgeführt werden.

8.2 Netzzustandsschätzung

Um aus den an verschiedenen Netzknoten aufgenommenen Messdaten ein konsistentes Netzabbild zu generieren, wird eine State Estimation durchgeführt. Ziel dieser Netzzustandsschätzung ist die Minimierung der Summe der gewichteten Fehlerquadrate F_g , welche aus den Messfehlern Δz gebildet wird.

$$F_g = \left(\frac{\Delta z_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z_2}{\sigma_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta z_n}{\sigma_n}\right)^2$$

Im Projekt werden 2 mögliche Ansätze zur Realisierung einer Netzzustandsschätzung im unsymmetrisch belasteten Niederspannungsnetz verfolgt. Die erste Variante sieht eine State Estimation mit Hilfe der Software MATLAB und SINCAL vor, die entsprechende Software zur Netzzustandsschätzung wurde bereits in MATLAB implementiert. Dieser erste Lösungsansatz basiert auf einer Reihe (unsymmetrischer) Lastflussberechnungen, wobei mit Hilfe der Messdaten in jedem Iterationsschritt eine Anpassung der Eingabedaten P und Q aller im betrachteten Netz vorhandenen Haushalte anhand des Verhältnisses von gemessener zu errechneter Spannung erfolgt, um eine Konvergenz zu erreichen.

Das Spannungsverhältnis s_k an Netzknoten k ergibt sich für den Iterationsschritt i als Quotient der aktuell errechneten Spannung $u_{k,i}$ und des gemessenen Wertes $u_{k,mess}$.

$$\text{Spannungsverhältnis } s_k = \frac{u_{k,i}}{u_{k,mess}}$$

Anhand dieses Verhältnisses wird für jeden Netzknoten ein neuer Arbeitspunkt P_{i+1} und Q_{i+1} errechnet, wobei hier auf die Lastflussrichtung geachtet werden muss (Last oder Einspeisung).

$$P_{Last,i+1} = ((s_k - 1) \cdot w + 1) \cdot P_{Last,i}$$

$$Q_{Last,i+1} = ((s_k - 1) \cdot b + 1) \cdot Q_{Last,i}$$

$$P_{Einspeisung,i+1} = \left(\left(\frac{1}{s_k} - 1\right) \cdot w + 1\right) \cdot P_{Einspeisung,i}$$

$$Q_{Einspeisung,i+1} = \left(\left(\frac{1}{s_k} - 1\right) \cdot b + 1\right) \cdot Q_{Einspeisung,i}$$

Diese Anpassung mit jeweils folgender erneuter Lastflussrechnung wird fortgeführt, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist, d.h., bis die Messfehler bzw. die Summe der gewichteten Fehlerquadrate ein Minimum erreicht hat. Die Vorgehensweise dieser Methode ist noch einmal in Abbildung 75 dargestellt. Der gesuchte konsistente Netzzustand ergibt sich schließlich aus den finalen Spannungsbeträgen und -winkeln aller Knoten (Zustandsvektor x).



Abbildung 75: Flussdiagramm der State Estimation nach erster Methode unter Verwendung von MATLAB und SINCAL

In der gleichen Weise wurden 2 weitere Iterationen im Vorfeld dieses Algorithmus eingeführt. Bei der ersten handelt es sich um eine Voriteration, um anhand gemessener Spannungen ermittelte Pseudo-Messwerte von Wirk- und Blindleistungen an nicht real gemessenen Haushalten genauer festzulegen. Eine darauf folgende Zwischeniteration soll im Gegensatz zur eigentlichen Hauptiteration zunächst nur Knoten mit großen Leistungen betrachten, um hier bereits eine Annäherung an die Lösung zu erreichen. Die Vorgehensweise kann detailliert der Bachelorarbeit „Realisierung einer Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen in MATLAB® unter Verwendung der Software PSS®SINCAL“ (F. Van Gompel, Lehrstuhl EES, Erlangen 2015) entnommen werden.

Ein zweiter Lösungsansatz, welcher derzeit noch umgesetzt wird, sieht die Realisierung einer Ausgleichsrechnung vor. Im technischen Zwischenbericht zum 2. Quartal 2015 des Projektes SGS wurde die Vorgehensweise bereits grundsätzlich beschrieben. Basierend auf dem Netzmodell sowie den Mess- und den gesuchten Zustandsgrößen wird ein Gleichungssystem zur Ermittlung von F_g aus Messvektor z und gesuchtem Zustandsvektor x aufgestellt. Die Gleichung

$$z' = z + \Delta z$$

wird dabei nach den Messfehlern Δz aufgelöst und in die Gleichung zur Ermittlung von F_g eingesetzt, die realen Werte z ergeben sich dabei nach

$$z = h(x)$$

$h(x)$, das sogenannte Messmodell, gibt dabei den formelmäßigen Zusammenhang der Zustandsgrößen und der Messgrößen wieder. Zur Ermittlung der Zustandsgrößen x muss die Summe der Fehlerquadrate minimiert werden, dazu wird F_g nach den Elementen des Zustandsvektors x partiell abgeleitet und zu Null gesetzt. Damit ergibt sich ein Gleichungssystem, aus welchem die gesuchten Größen x iterativ ermittelt werden können.

Um das Gleichungssystem lösen und damit eine Netzzustandsschätzung durchführen zu können, wird eine Redundanz r von 1 gefordert, was allgemein als ausreichend angesehen wird.

$$r = \frac{m}{(2k-1)} - 1$$

Dabei ist m die Anzahl der Messwerte und k die Zahl der Netzknoten. Es sind demnach insgesamt $2k-1$ Unbekannte im Netz vorhandenen, da sich der Netzzustand durch Spannungsbetrag und Spannungswinkel an allen Netzknoten ergibt, wobei ein Winkel am Slackknoten vorgegeben wird. Aus der Annahme, dass ein Netz mit n Hausanschlüssen etwa $2n$ Netzknoten besitzt (ein Anschlussknoten und eine Muffe an der Hauptleitung), kann abgeleitet werden, dass m einen Wert von $8n$ annehmen muss, pro Hausanschluss demnach mindestens 8 Messwerte vorhanden sein müssen. Da vor allem in der Niederspannung die notwendige Anzahl an Messdaten in der Regel nicht erreicht werden kann, muss der Datensatz durch eine Lastflussberechnung zunächst ergänzt werden, um eine Zustandsschätzung zu ermöglichen.

Von dieser Art der Pseudomesswerte zu unterscheiden ist die Vervollständigung des Datensatzes bei fehlenden Messpunkten im Netzgebiet, um so die Beobachtbarkeit des Netzes wiederherzustellen. In der bereits entwickelten Softwarelösung zur Netzzustandsschätzung werden Pseudomesswerte bislang durch eine Mittelwertbildung aller vorhandenen, gleichartigen Messdaten errechnet. 3 weitere Möglichkeiten einer Bestimmung von Pseudomesswerten werden derzeit realisiert. Neben der Verwendung von Standardlastprofilen (BDEW bzw. selbst generierte Profile) oder historischen Messdaten können auch Werte basierend auf Anlagendaten (Dachneigung, -ausrichtung, installierte Leistung, solare Einstrahlung) simuliert werden. Mittels GUI kann zwischen

den verschiedenen Methoden zur Erstellung von Pseudomesswerten ausgewählt werden. Der Code (m-File) wird in die bereits bestehende Software zur Zustandsschätzung eingebunden und später auch bei der 2. Lösung zur State Estimation angewendet.

Allgemein ist anzumerken, dass beide genannten Lösungsansätze der Netzzustandsschätzung unterschiedliche Möglichkeiten bieten. Methode 2 der State Estimation wird eine höhere Genauigkeit hinsichtlich der Annäherung an das Minimum von F_g aufweisen, da der Netzzustand durch die Lösung eines Gleichungssystems ermittelt wird, wohingegen die erstgenannte Methode keine optimale Lösung garantieren kann. Dagegen hat oben beschriebene Methode zur Netzzustandsschätzung auf Basis einer Reihe von Lastflussberechnungen niedrigere Anforderungen an die vorhandenen Messdaten, was speziell in der Niederspannung von Vorteil ist. Gerade bei einer hohen Anzahl fehlender Messpunkte oder bei großen Messfehlern besteht bei Variante 2 die Gefahr, dass die Iteration zu keiner Lösung des Gleichungssystems führt, wohingegen Methode 1 immer einen Netzzustand ermitteln kann. Da bei Lösung 1 lediglich die Messdaten der Lasten und Einspeisungen relevant sind, kann die Problematik der Redundanz bzw. der Beobachtbarkeit des Netzes zunächst umgangen werden. Gerade bei Netzen mit einer Vielzahl an nicht zugänglichen Knoten oder Knoten, welche sich nicht in der Nähe von Messpunkten (Haushalten) befinden, hat die erste Methode damit entscheidende Vorteile.

8.3 Lastprofile, Einspeiseleistungen und Netzspannungen

Auf Basis der in den beiden Netzgebieten gewonnenen Messdaten konnten Erkenntnisse gewonnen werden zum Einspeiseverhalten von PV-Anlagen, zur Höhe und dem Verlauf von Haushaltslasten sowie zu den Auswirkungen auf das Netz in Hinsicht auf die Spannungen. Diese Ergebnisse können wichtige Anhaltspunkte für theoretische Netzbetrachtungen bieten, welche die Basis bilden für weitere Maßnahmen zur Integration Erneuerbarer Energien oder zur Ertüchtigung der Verteilnetze. Auch werden die Erkenntnisse genutzt zur Erstellung von Pseudomesswerten bei der Netzzustandsschätzung.

In einem ersten Schritt wurden die Messdaten der Haushaltslasten mit den Standardlastprofilen von BDEW verglichen. Bei BDEW-Profilen sind für Werktage, Samstage und Sonn- bzw. Feiertage vorhanden und zeigen jeweils den gemittelten Lastverlauf eines typischen Haushalts über 24h. Dabei wird je nach Jahreszeit unterschieden zwischen Sommer (15.05. – 14.09.), Winter (01.11. – 20.03.) und Übergangszeit (01.03. – 14.05. und 15.09. – 31.10.). Entsprechend diesen Vorgaben wurden aus den von Ende 2014 bis Mitte des Jahres 2016 gesammelten Messdaten in Epplas und Schlottenhof ebenfalls Lastprofile für die einzelnen Haushalte sowie für das jeweilige gesamte Netzgebiet gebildet. Anders als bei BDEW wurden Werktage allerdings nochmal nach dem Wochentag unterschieden, sodass sich insgesamt 7 Profile ergeben. Die Profile eines ergeben sich dabei aus den Mittelwerten aller vorhandenen Messwerte eines jeden verfügbaren Zeitpunktes des jeweiligen Tages. Als Beispiel ist in Abbildung 76 das errechnete Profil eines Sonntages (Winter) aller Haushalte in Epplas im direkten Vergleich mit dem entsprechend entnormierten BDEW-Profil gezeigt.

Generell sind die Abweichungen der erstellten Profile von den BDEW-Standardprofilen nur relativ gering und der prinzipielle Verlauf nach BDEW ist auch bei den Epplas- und Schlottenhof-Profilen erkennbar. Lediglich in Epplas zeigen sich in den Wintermonaten zum Teil höhere Werte gegenüber dem BDEW-Profil vor allem in den Abendstunden. Auch ist das lokale Maximum des Abend-Peaks tendenziell zu früheren Zeitpunkten hin verschoben. Bei allen Profilen aus dem Ortsteil Schlottenhof ist zur Mittagszeit eine markante Leistungsspitze zu sehen, welche das Resultat regelmäßiger hoher Leistungswerte von mehreren verschiedenen Haushaltslasten in diesem Gebiet ist.

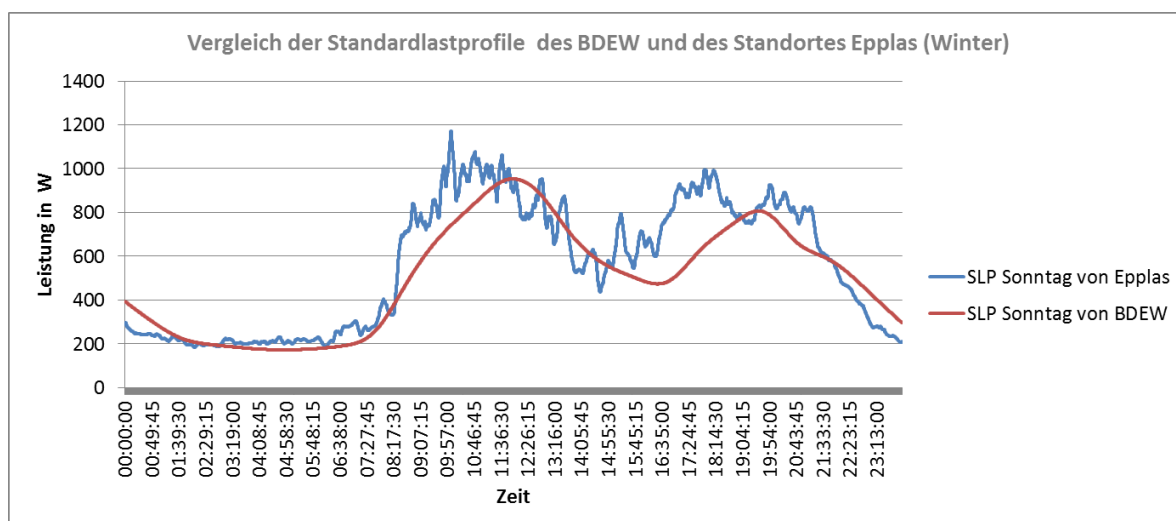


Abbildung 76: Vergleich des aus Messdaten (Epplas) erstellten Lastprofils mit dem BDEW-Standardlastprofil am Beispieltag Sonntag (Winter)

Neben der Ermittlung der Standardlastprofile, also einer Mittelwertbildung, ist auch die Untersuchung der Leistungsverteilung sowie der Maximalwerte der Lasten relevant. Diese Verteilungen für die Sommer-, Winter bzw. Übergangsmonate wurden aus allen vorhandenen Lastdaten von Epplas und Schlottenhof erstellt. Die absolute Anzahl an Werten eines jeden Intervalls (Sommer, Winter, Übergang) wurde dabei auf die Gesamtzahl der verfügbaren Messpunkte bezogen, um die Häufigkeitsverteilungen zu normieren (Abbildung 77).

Allgemein zeigt sich, dass die meisten Werte im Bereich unter 500 W liegen (ca. 80% der Messwerte in Sommer und Übergangsphase, ca. 70% im Winter), was nicht zuletzt auch der Schwachlastzeit in der Nacht geschuldet ist. Aber auch deutlich höhere Werte sind möglich, wobei im Winter (bzw. Übergang) gegenüber dem Sommer eine breitere Streuung der Werte zu beobachten ist. Die Maximalleistungen der einzelnen Haushalte schwanken im betrachteten Messzeitraum relativ stark. Während sich die meisten Werte maximal im Bereich zwischen 4 kW und 10 kW bewegen, können bei einigen Haushalten die Leistungen bei weit über 10 kW liegen, vereinzelt ergeben sich auch Lasten von fast 20 kW.

Mit den durch Messungen ermittelten höchsten Werten der Haushalte kommt man der allgemein für sogenannte Mischlasten angenommenen Anschlussleistung von ca. 21 kW bereits sehr nahe. Bei bisherigen Netzbetrachtungen wurde für den Worst-Case des Lastfalls für einzelne Haushalte eine gemäß dem Gleichzeitigkeitsfaktor reduzierte Leistung angenommen. Die Leistung pro Hausanschluss beträgt damit in Schlottenhof (85 Hausanschlüsse) ca. 1,6 kW und in Epplas (18 Hausanschlüsse) ca. 2,6 kW. Lässt man bei der Häufigkeitsverteilung nach Abbildung 77 die Werte unterhalb von 500 W, welche sich hauptsächlich aus den Schwachlastzeiten ergeben, außen vor, so sieht man, dass ca. 80% aller verbleibenden Werte kleiner sind als 2 kW. Zwischen 74% und 78% aller Werte über 500 W sind kleiner als 1,5 kW, zwei Drittel der Leistungen sogar niedriger als 1 kW. Vor diesem Hintergrund muss überprüft werden, ob die Annahme von Lasten mit 1,6 kW bzw. 2,6 kW für Worst-Case-Betrachtungen nicht zu groß gewählt sind, um das Netz auf realistische Betriebsbedingungen auszuliegen.

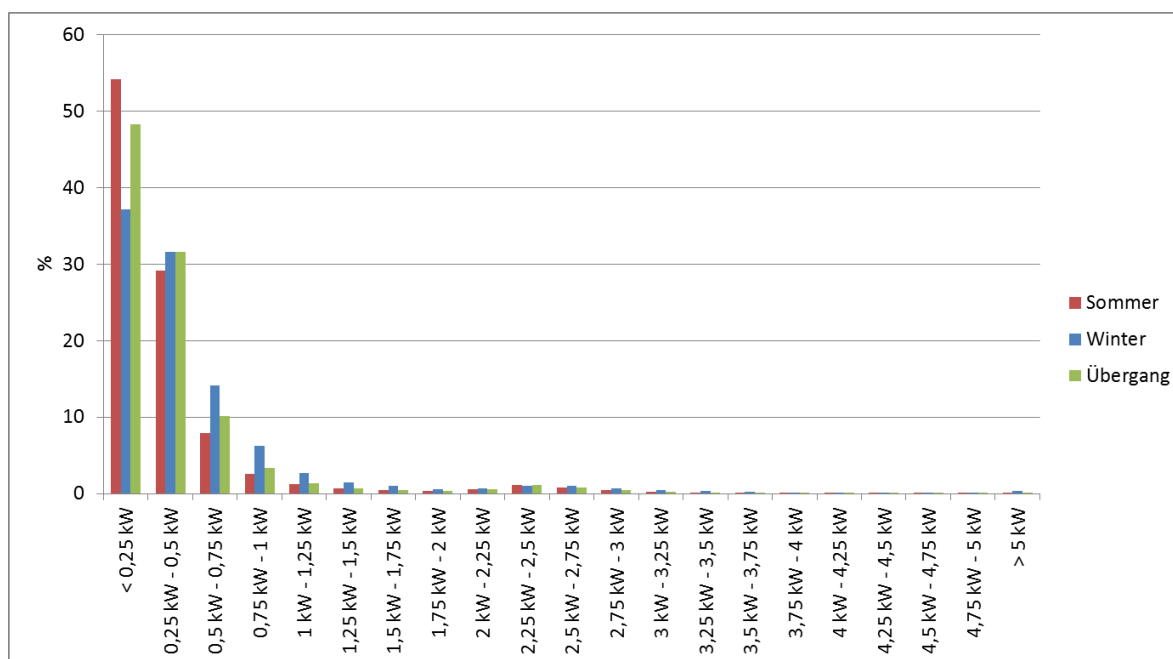


Abbildung 77: Häufigkeitsverteilungen (bezogen auf Gesamtzahl der Messwerte) der gemessenen Leistungen in Epplas und Schlottenhof im Zeitraum von Ende 2014 bis Mitte 2016

In einem zweiten Schritt wurden die Daten der PV-Einspeiseanlagen mit Hinblick auf Worst-Case-Betrachtungen des Rückspeisefalls näher untersucht. Dafür wurden die maximalen Einspeiseleistungen aller gemessenen PV-Anlagen im betrachteten Messzeitraum ermittelt, wobei zwischen verschiedenen Tagtypen unterschieden wurde. Zu diesem Zweck wurde eine Software in MATLAB entwickelt, welche für jede Anlage automatisiert die Tage anhand deren Einspeiseverläufen typisieren und die entsprechenden maximalen Leistungen ausgeben soll: wolkenloser Tag, wolkenloser Tag mit kurzem Leistungseinbruch, teilbewölkter Tag, bedeckter Tag oder bewölkter Tag. Die beiden letzten Typen unterscheiden sich dabei in der Höhe der Einspeisekurve, als bewölkt wird ein Tag bei sehr niedrigen Leistungen gesehen, als bedeckt gilt der Tag bei mittleren Werten. Mit den Ergebnissen der Software wurden anschließend an allen Tagen, welche zu den 3 Typen wolkenlos, wolkenlos mit Leistungseinbruch oder teilbewölkt gehören, die maximale Einspeiseleistung bezogen auf die jeweilige STC-Leistung einer jeden der 18 PV-Anlagen bestimmt. Zusätzlich zu den maximalen Einspeiseleistungen wurden auch die Differenzen von maximaler zu minimaler Leistung innerhalb einer Stunde näher untersucht. Die grundlegenden Erkenntnisse der Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Auswertung der Einspeiseleistungen aller 18 messtechnisch erfassten PV-Anlagen in Epplas und Schlottenhof. Verhältnis von maximaler Einspeiseleistung zu STC-Leistung sowie Differenz von maximaler und minimaler Einspeiseleistung innerhalb einer Stunde (bezogen auf STC-Leistung) für die 3 Tagtypen wolkenlos, wolkenlos mit Leistungseinbruch und teilbewölkt.

		Tagtyp		
		Wolkenlos	Wolkenlos mit Leistungseinbruch	Teilbewölkt
Maximale Einspeiseleistung / STC-Leistung [%]	Mittelwert	83,8	84,6	94
	Maximalwert	98,4	95,3	112,7
	Minimalwert	69,9	70,4	75,1
Höchste Differenz von max. zu min. Einspeiseleistung innerhalb einer h bezogen auf STC-Leistung [%]	Mittelwert	24,6	65,6	88
	Maximalwert	55	78,7	105,1
	Minimalwert	11,4	24,6	68,9

Bei einem Vergleich von wolkenlosem (bzw. wolkenlos mit Leistungseinbruch) mit teilbewölktem Tag wird klar, dass sich durch Einstrahlungsüberhöhungen in Folge einer Teilbewölkung entsprechend kurzzeitig hohe Leistungen der Anlagen ergeben. Im Mittel liegt die Einspeisung bezogen auf die installierte Leistung der jeweiligen Anlage bei teilbewölkten Tagen um 10% höher als an wolkenlosen Tagen. An teilbewölkten Tagen liegen diese bei vier Anlagen bei über 100% der STC-Leistung, weitere Leistungen bewegen sich im Bereich um die 100%, während die Werte an wolkenlosen Tagen nur bei wenigen Anlagen über 90% liegen. Es zeigt sich allerdings auch, dass die Werte bei teilbewölktem Tag eine breitere Streuung aufweisen, die Einspeiseleistungen können je nach Anlage zwischen 75% und fast 113% schwanken, wohingegen die Quotienten bei wolkenlosem Tag einen kleineren Bereich von 70% bis etwa 98% aufweisen.

Die Differenzen von Maximal- zu Minimalleistung sind erwartungsgemäß bei wolkenlosen Tagen mit im Mittel 24,6% eher gering. Meist liegen die Differenzen unterhalb von 20%, lediglich bei einigen Anlagen zeigen sich hier größere Werte bis 50%. Etwas größer fallen die Differenzen naturgemäß bei den wolkenlosen Tagen aus, welche einen Einbruch aufweisen. Hier zeigt sich, dass ein kurzer Einbruch der Einspeiseleistung im Mittel bei 65,6% liegt, wobei die Differenz von Maximum zu Minimum bis zu 79% betragen, aber auch bei lediglich 24,6% liegen kann. Mit einem Mittelwert von 88% liegen die Unterschiede bei teilbewölkten Tagen erwartungsgemäß deutlich höher, die Werte können dabei zwischen 69% und 105% schwanken. Das zeigt, dass sich die Einspeiseleistungen innerhalb kurzer Zeit stark verändern können, was wiederum Herausforderungen birgt für eventuelle Gegenmaßnahmen wie beispielsweise Speicher oder auch regelbare Verbraucher.

Der Mittelwert der bezogenen Einspeiseleistungen bei wolkenlosem Tag (eingeschlossen wolkenlos mit Einbruch) liegt bei 84,2%. Dies wiederum deckt sich mit den Erkenntnissen des Papers „Untersuchung zu den Auswirkungen von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder- und Mittelspannungsnetz“ (R. Pardatscher, W. Rolf, Internationaler ETG-Kongress, Würzburg 2011), hier wird eine durchschnittliche Einspeiseleistung von 85% der STC-Leistung angegeben. Unter Umständen muss bei Worst-Case-Berechnungen allerdings auch von deutlich höheren Werten ausgegangen werden, wie die Ergebnisse bei teilbewölkten Tagen zeigen. Die Annahmen für PV-Einspeisungen hängen dabei wesentlich von der Fragestellung der Netzberechnung ab. Speziell bei Betrachtungen zur Speicherauslegung kann ein Wert von 85% angenommen werden, sollen jedoch Spannungserhöhungen und Strombelastung von Betriebsmitteln untersucht werden, so müssen höhere Werte angenommen werden, beispielsweise der hier errechnete Mittelwert der bezogenen Einspeiseleistungen an teilbewölkten Tagen von 94%.

Nicht zuletzt ist die Spannung an den Hausanschlüssen im Netz interessant. Hier wurden mittels Software für alle Tage des betrachteten Messzeitraumes die jeweils 5 Stunden mit den höchsten Spannungen ermittelt. Aus der Häufigkeitsverteilung der Maximalspannungen in den Ortsnetzen Epplas und Schlottenhof im betrachteten Zeitraum wird deutlich, dass diese in der Regel über 235 V liegen. Dabei entfallen in Schlottenhof ca. 90% der Werte auf das Intervall 235 V – 240 V und 10% auf den Bereich 240 V – 245 V. Insgesamt sind die Maximalspannungen im Ortsteil Schlottenhof als unauffällig einzustufen. Im Ortsnetz Epplas befinden sich die meisten Werte zunächst ebenfalls in diesen beiden Bereichen (235 V – 240 V: 64%, 240 V – 245 V: 29%). Jedoch gibt es Werte unterhalb von 230 V (2% aller Werte), demgegenüber liegen aber auch fast 5% der Maximalspannungen über 245 V.

Die höchste gemessene Spannung liegt dabei mit 252,52 V nur knapp unter der gemäß DIN IEC 60038 zulässigen Spannungsgrenze von 253 V. Gemessen wurde dieser Wert an der PV-Anlage des Hausanschlusses Epplas 5, welcher sich ca. 400m von der Ortsnetzstation befindet. Im technischen Zwischenbericht zum 3. Quartal 2014 des Projekts Smart Grid Solar wurden bereits theoretische Berechnungen des Netzes vorgestellt, welche die höchste Netzspannung ebenfalls an dieser Stelle ermittelten. Zum Zeitpunkt der hohen gemessenen Spannung lag die Ausgangsspannung des Ortsnetztransformators selbst bereits bei 238,9 V, was zu einer Spannungserhöhung im gesamten Ortsnetz führte. Diese hohe Ausgangsspannung kann das Resultat einer entsprechend

hohen Spannung auf Seiten der Mittelspannung sein. Bei der Untersuchung der Einbindung regenerativer Energien soll mittels Software der Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators untersucht werden, welcher mittels Stufensteller solche Situationen vermeiden könnte.

Zusätzlich zu den Maximalwerten der 5 Stunden eines jeden Tages mit den höchsten Spannungen wurden auch die Minimalspannungen der jeweiligen Stunden aufgenommen und die Differenzen von Maximal- und Minimalwert gebildet, um zu untersuchen, wie stark die Spannung innerhalb einer Stunde schwanken kann. Aus diesen Differenzen wurden wiederum für jeden einzelnen Zähler die höchsten Werte ermittelt. Diese liegen dabei im Bereich von 6,5 V bis zu 18 V, können demnach erheblich sein. Die Ursachen dieser Spannungsschwankungen können dabei sowohl in Schalthandlungen der übergeordneten Spannungsebene als auch in stark schwankenden Einspeiseleistungen von PV-Anlagen (z.B. bei Teilbewölkung) liegen.

Zu den bisherigen Ergebnissen sollen noch weitere Auswertungen der Messdaten folgen. Hinsichtlich der Netzbelastung spielt auch die Blindleistung, vor allem bei Haushalten, eine wichtige Rolle und soll daher ähnlich der Wirkleistung näher betrachtet werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen können einmal verwendet werden, um für die State Estimation eine genauere Abschätzung fehlender Messwerte (Pseudomesswerte) zu ermöglichen, hier sind vor allem die Lastprofile relevant. Zum anderen können die Erkenntnisse in die Assetplanung einfließen und werden in der im nächsten Punkt erläuterten Software zur Einbindung regenerativer Energien in Verteilnetze weiter verwendet. Hierbei sind in erster Linie die Ergebnisse zur Betrachtung von Worst-Case-Szenarien von Bedeutung, um darauf basierend Maßnahmen zur Netzertüchtigung vorzuschlagen. Mit Hilfe der Software sollen aber auch Netzauslegungen anhand von kritischen Netzzuständen, welche sich aus den Messdaten ergeben, vorgenommen werden.

In einem nächsten Schritt werden daher anhand der Messdaten von Einspeiseleistungen und Spannungen kritische Zeitpunkte ausgewählt, welche dann näher untersucht werden sollen. Für diese Worst-Case-Szenarien wird anschließend gezielt eine Netzzustandsschätzung durchgeführt, um einen konsistenten Netzzustand und damit Leistungsdaten aller Hausanschlüsse zu erhalten. Auf Basis der sich ergebenden Zustände kann dann neben den Netzspannungen auch die Strombelastung der Betriebsmittel untersucht werden. Damit können wiederum die verschiedenen möglichen Maßnahmen zur Verhinderung von hohen Spannungen und Strombelastungen (regelbarer Ortsnetztransformator, Netzregler, Netzausbau, Speichereinsatz, Abregelung PV-Anlagen) ausgelegt werden.

8.4 Einbindung regenerativer Anlagen in Niederspannungsnetze und Ableitung von Leitlinien zur Assetplanung

Nach aktuellem Stand werden Netze, in Ermangelung realer Messwerte speziell in den unteren Spannungsebenen, mittels Worst-Case-Betrachtungen theoretisch analysiert und konventionell ausgebaut, um die zulässigen Grenzwerte von Strombelastung und Spannung einzuhalten. Hieraus ergibt sich für viele bestehende Netze die Möglichkeit, regenerative Erzeugungsanlagen ohne weiteren Ausbau einzubinden. Mit Hilfe eines MATLAB-Codes soll auf Basis eines in SINICAL vorhandenen Netzes eine automatisierte Untersuchung ermöglicht werden, inwieweit ein Zubau von Einspeiseanlagen in einem noch nicht voll ausgelasteten Netz möglich ist.

Hierbei werden zunächst Annahmen für das Worst-Case-Szenario eines Rückspeisefalls getroffen und ein zulässiges Spannungsband vorgegeben. Im SINICAL-Netz werden schließlich neben den bereits bestehenden PV-Anlagen zusätzliche Elemente eingefügt an den Knoten, an denen ein Zubau untersucht werden soll. Auch vorgegeben werden die maximalen Leistungen dieser Zubauanlagen, wobei diese lediglich das Verhältnis der zugebauten Einspeiseleistungen zwischen den Zusatzanlagen repräsentieren soll und zunächst keine absolute Grenze darstellen soll. Im ersten Schritt wird festgestellt, ob nach gegebenem Ist-Zustand des Netzes ein weiterer Zubau unter Berücksichtigung der vorgegebenen Rahmenbedingungen möglich ist. Werden bereits Grenzwerte verletzt, so wird dies durch die Software gemeldet und die Ergebnisse der Netzanalyse vorgestellt. Ist ein Zubau möglich, so werden die Einspeiseleistungen der Zusatzanlagen gemäß ihrem vorgegebenen Verhältnis zueinander solange schrittweise erhöht, bis das Spannungsband oder die zulässige Strombelastung nicht mehr eingehalten werden. Die Berechnungsergebnisse von Ist- und Zubauzustand des Netzes werden schließlich gegenübergestellt.

Derzeit beschränkt sich die Software noch auf die Untersuchung eines Zubaus bei symmetrischer Netzbelastung unter Einhaltung des vorgegebenen Spannungsbandes. Im nächsten Schritt wird zunächst die Unterscheidung des Zubaus nach Stromkreisen implementiert, damit der Zubau für jeden Stromkreis getrennt untersucht werden kann. Anschließend folgt die Erweiterung auf unsymmetrische Lasten und Einspeisungen. Zum Abschluss soll auch der Zubau unter dem Gesichtspunkt einer maximal zulässigen Strombelastung automatisiert werden. Dabei genügt nicht mehr eine Unterscheidung rein nach Stromkreisen, sondern es muss je nach überlasteter Leitung ermittelt werden, welche Zusatzeinspeiseanlagen betroffen sind.

Im Gegensatz zu Gebieten, welche Zubau-Potential aufweisen, muss unter Umständen ein bestehendes Netz bei (geplantem) Zubau neuer Lasten oder Einspeiseanlagen ertüchtigt werden, um eine maximal zulässige Betriebsmittelbelastung bzw. ein gegebenes Spannungsband einhalten zu können. Neben klassischem Netzausbau können hierbei verschiedene weitere Maßnahmen

bei der Integration von Einspeiseanlagen helfen. Für die Möglichkeit eines Speichereinsatzes zur Spannungshaltung mittels Wirk- oder Blindleistungsmanagement wurde ein entsprechender MATLAB-Code zur automatisierten Untersuchung entwickelt. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, einen Netzregler oder regelbaren Ortsnetztransformator (rONT) einzusetzen, um so direkt Einfluss auf die Spannung zu nehmen. Auch eine Abregelung der vorhandenen Einspeiseanlagen oder eine Spannungsreduzierung mittels Blindleistungsregelung an Wechselrichtern kann in Betracht gezogen werden.

Aktuell wird eine Software realisiert, welche automatisch SINICAL-Netze analysieren und die konkreten Umsetzungen der 5 möglichen Maßnahmen (Netzausbau, rONT, Netzregler, Speichereinsatz, Regelung PV) gegenüberstellen soll. Abbildung 78 zeigt die Vorgehensweise bei der Analyse der Netze und der Umsetzung von Maßnahmen.

Das gegebene Netz wird in einem ersten Schritt mittels Lastflussberechnung analysiert, wobei sowohl der Last- als auch der Rückspeisefall betrachtet werden. Die entsprechenden Rahmenbedingungen für diese Worst-Case-Szenarien müssen vorgegeben werden. Schließlich werden für alle 5 betrachteten Möglichkeiten konkrete Umsetzungen sowohl für den Last- als auch für den Rückspeisefall ermittelt. Diese werden wiederum zusammengefasst und gegenübergestellt.

Neben der Betrachtung von Worst-Case-Szenarien soll außerdem eine Möglichkeit implementiert werden, Messwerte eines Zeitraumes einzugeben, anhand derer reale Grenzwertverletzungen sowie evtl. notwendige Maßnahmen zur Netzertüchtigung untersucht werden sollen. Gegebenenfalls ist hier zuvor eine State Estimation erforderlich, um einen vollständigen Datensatz zu erhalten. Anhand der Zeitpunkte höchster Strombelastung bzw. maximaler und minimaler Spannung im gesamten Netz werden konkrete Umsetzungsvorschläge zusammengestellt. Am Ende kann die Netzertüchtigung bei theoretischer Netzanalyse (Worst-Case-Betrachtungen) mit den Maßnahmen bei Auswertung der Messdaten verglichen werden.

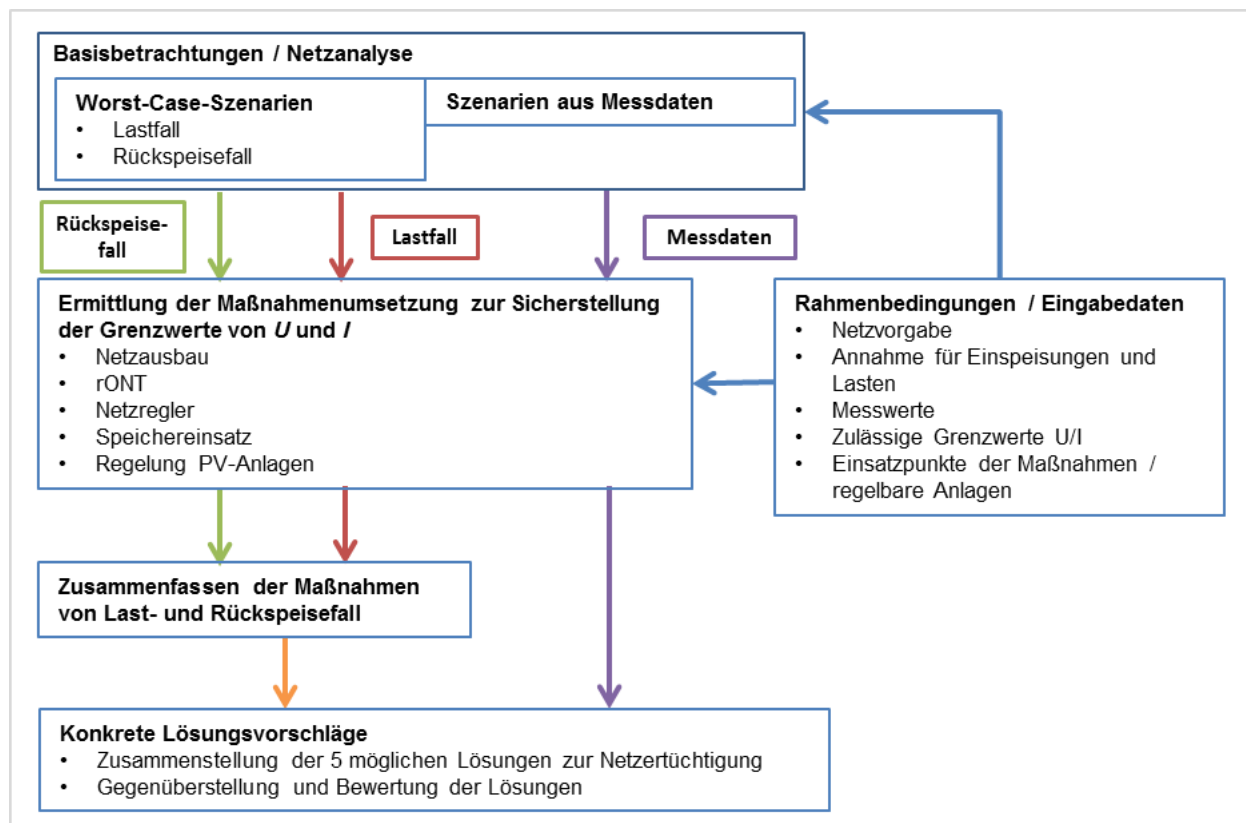


Abbildung 78: Flussdiagramm Software Netzintegration

Die Betrachtungen dieser Maßnahmen zur Netzerweiterung und zur Integration von Einspeiseanlagen stützen sich auf Annahmen des Worst-Cases. Dabei wird für PV-Anlagen bei konventionellen Worst-Case-Betrachtungen in der Regel von einer symmetrischen Einspeisung in Höhe der installierten Leistung ausgegangen. Um eine Über- oder auch Unter-Dimensionierung der Betriebsmittel eines Netzes, dazu gehören neben Transformatoren und Kabeln bzw. Freileitungen auch Komponenten wie Speicher und Netzregler, zu vermeiden, ist ein Einsatz realistischer Last- und Einspeiseprofile bei der Netzberechnung ein wichtiges Ziel. Hierbei können Erkenntnisse aus der Auswertung der gewonnenen Messdaten der Gebiete Epplas und Schlottenhof gezogen werden, wie sie zum Teil oben bereits vorgestellt wurden. Die Messdaten zeigen zudem, dass eine Beachtung der Ausgangsspannung des versorgenden Transformators unerlässlich ist, um realistische Aussagen zu Netzzuständen im Worst-Case treffen zu können.

Mittelfristig soll mit der Verbesserung der Worst-Case-Betrachtungen, neben einer möglichst vorausschauenden und genaueren Dimensionierung und Bewertung des Netzes, vorwiegend eine kostenoptimierte Planung notwendiger Investitionen gewährleistet werden.

8.5 Zukünftige Arbeiten im Projekt Smart Grid Solar

Hauptaugenmerk in der verbleibenden Projektlaufzeit bis Ende Mai 2017 liegt zum einen auf einer weiterführenden Auswertung der gewonnenen Messdaten zur Überprüfung evtl. vorhandener kritischer Betriebspunkte im Netz, zum anderen auf der Fertigstellung der Softwarelösungen und deren Anwendung auf die Netzgebiete Epplas und Schlottenhof.

Die bereits implementierte Software zur Durchführung einer State Estimation auf Basis einer Reihe von Lastflussberechnungen um die bereits beschriebenen Möglichkeiten zur Erstellung von Pseudomesswerten erweitert. Parallel dazu wird die zweite Variante einer Software zur Netzzustandsschätzung wie auch der MATLAB-Code zur Ermittlung von Maßnahmen zur Integration erneuerbarer Einspeisungen in Verteilnetze fertiggestellt.

Neben einer Untersuchung des Blindleistungsbedarfs der Haushaltslasten zur Verwendung in der Assetplanung werden in einem weiteren Schritt die Messdaten der PV-Anlagen sowie die Netzspannungen näher untersucht. Ziel ist die Ermittlung kritischer Netzzustände, in denen die PV-Anlagen hohe Einspeiseleistungen aufweisen bzw. damit verbunden hohe Netzspannungen auftreten. Demgegenüber können auch niedrige Knotenspannungen in Folge hoher Lasten als kritisch angesehen werden, eine Auswertung der Spannungen im unteren Bereich muss erst noch erfolgen. Für die gewählten Zeitpunkte wird im Anschluss eine State Estimation durchgeführt, um einen konsistenten Betriebszustand zu erhalten, aus dem wiederum auf die Strombelastungen geschlossen werden kann. Die Netzzustände werden daraufhin genauer untersucht, um die Ursachen der extremen Betriebszustände zu erörtern und daraus gegebenenfalls Leitlinien zum Netzbetrieb ableiten zu können.

Anhand dieser Betriebspunkte können darüber hinaus gegebenenfalls die verschiedenen möglichen Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen hoher Lasten oder speziell hoher PV-Rückspeisungen (regelbarer Ortsnetztransformator, Netzregler, Netzausbau, Speichereinsatz, Abregelung PV-Anlagen) untersucht werden. Sollte es sich dabei als möglich herausstellen, weitere regenerative Einspeiseanlagen in das Netz zu integrieren, kann die mögliche Zubauleistung der Netze unter verschiedenen Rahmenbedingungen untersucht werden.

9 SWARM – Technische und ökonomische Untersuchung der wirtschaftlichen und netzverträglichen Betriebsweise eines Kleinspeicherverbunds

9.1 Auslegung und Optimierung intelligenter Verteilnetzstrukturen durch Integration elektrischer Batteriespeichersysteme

In Zusammenarbeit mit der N-ERGIE AG und der Caterva GmbH wurde das Pilotprojekt SWARM (Storage With Amply Redundant Megawatt) im Februar 2014 begonnen. Das Projekt umfasst die Installation von Batteriespeichersystemen (BSS) auf Lithium-Ionen Basis im Netzgebiet der Main-Donau Netzgesellschaft mbH (MDN), welche eine Tochterfirma der N-ERGIE AG ist.

Das von Caterva entwickelte BSS mit einer Gesamtleistung und -kapazität von 20 kW und 21 kWh richtet sich hauptsächlich an Privathaushalte, die deutlich mehr als die durchschnittlich üblichen 30 Prozent ihres selbst erzeugten Photovoltaik (PV)-Stroms verbrauchen möchten. Eine 60- bis 80-prozentige Nutzung und damit eine hohe Deckung des individuellen Strombedarfs aus Eigenerzeugung sind durch BSS möglich.

Darüber hinaus sind im Rahmen dieses Gemeinschaftsprojekts ca. 65 Batteriespeichersysteme über Mobilfunk virtuell vernetzt (siehe Abbildung 79), um eine Gesamtleistung von mehr als 1 MW zu erreichen. Dadurch wurde der Speicherverbund im Sommer 2015 für die Bereitstellung von Primärregelleistung (PRL) von der TenneT TSO GmbH erfolgreich präqualifiziert und somit kann der Großspeicher Systemdienstleistungen im Stromnetz übernehmen. Das vom Freistaat Bayern geförderte Projekt SWARM ist das erste Vorhaben in Deutschland, das die Erbringung von sowohl positiver – Leistungseinspeisung im Falle eines Leistungsbedarfs im Netz – als auch negativer – Speicherung bei Leistungsüberangebot im Netz – Primärregelleistung aus verteilten Batteriespeichern zur Anwendung bringt. Die Überwachung und Steuerung der einzelnen BSS erfolgt durch die Leitwarte der N-ERGIE und der Caterva.

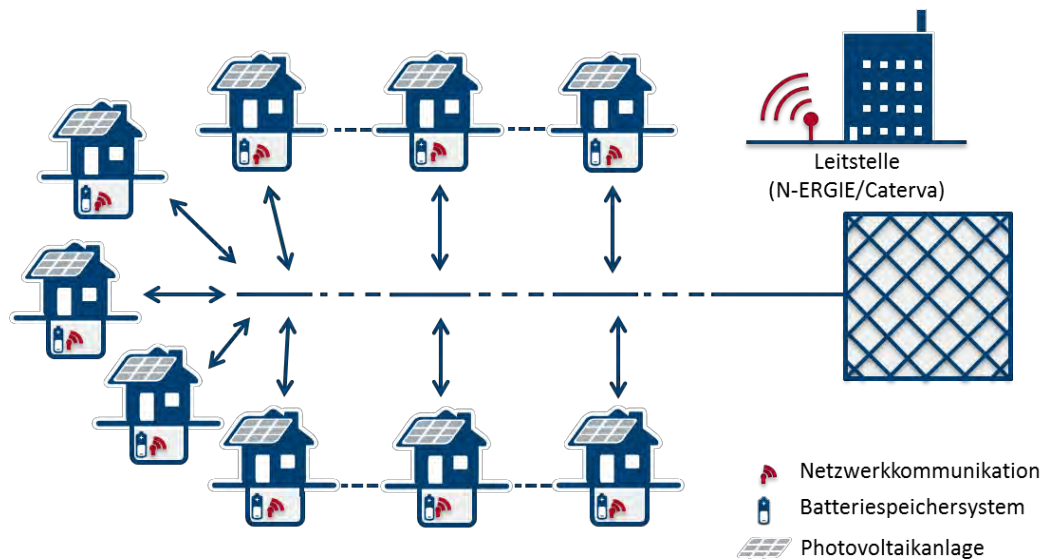


Abbildung 79: Integration von Haushaltsspeichersystemen im elektrischen Netz als Speicherverbund

Wie in Abbildung 80 illustriert, kooperieren drei Lehrstühle der FAU bzw. des EnCN seit Anfang 2015 hinsichtlich dieser wissenschaftlichen Begleitstudie mit dem Nürnberger Energieversorger. Das Forschungsprojekt wird seitens EnCN vom Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (LEES) koordiniert.

Die Gesamtdauer des Projekts beträgt 3 Jahre. Bis Ende 2017 bzw. Anfang 2018 soll die Begleitstudie abgeschlossen werden.

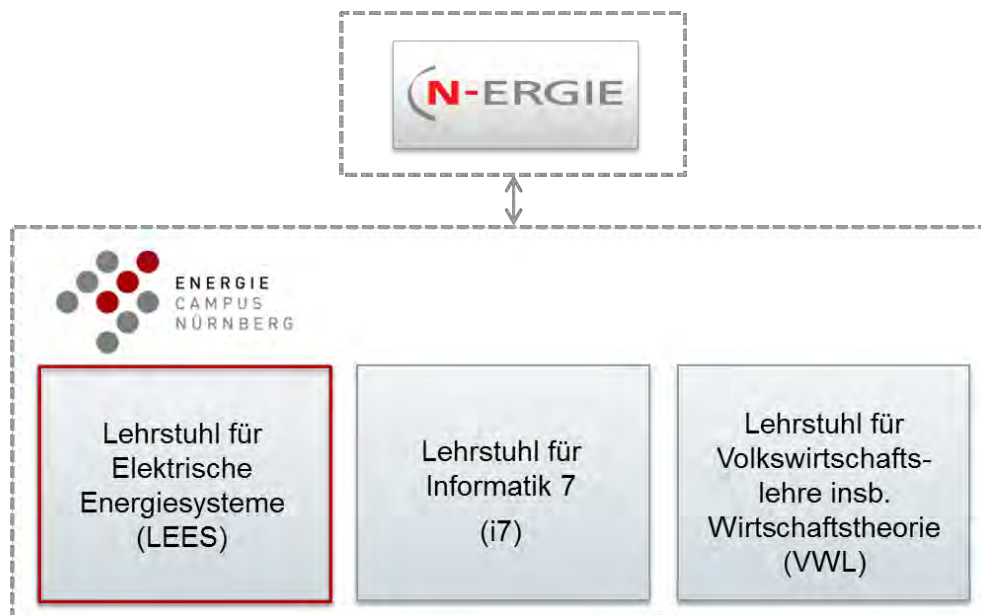


Abbildung 80: Überblick über die Projektpartner

Im Rahmen des Projekts sollen u. a. die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Unter welchen Bedingungen investieren Privathaushalte in innovative Stromspeicher?
- Wie wirken die Speicher auf den stationären Betrieb der Verteilnetze sowie auf die Frequenzregelung in Übertragungsnetzen?
- Welche ökonomischen Nutzen ergeben sich aus Sicht des Netzbetreibers bzw. der Privathaushalte?

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen am LEES liegt sowohl auf den Betriebs- und Planungsaspekten von Verteilnetzen als auch auf dem Frequenzregelverhalten in Übertragungsnetzen. Einerseits wird das Zusammenspiel zwischen PV, Speichersystemen und Verteilnetzen der MDN analysiert; andererseits stehen die Analysen zur Auswirkung von Verbundspeichern auf die Frequenzregelung in heutigen und zukünftigen Energiesystemen bei den Simulationen in Übertragungsnetzen im Fokus. Die Vorgehensweise und die markanten Ergebnisse der im Rahmen des Projekts durchgeführten Netzanalysen sind nachfolgenden in zwei Abschnitten dargestellt.

9.2 Einfluss dezentral verteilter Batteriespeichersysteme auf Verteilnetze

Der Einsatz verteilter dezentraler BSS zur Erhöhung der Eigennutzung von PV-Strom und zur Frequenzhaltung kann das Betriebsverhalten von Verteilnetzen beeinflussen. In Anbetracht der steigenden Nachfrage nach Batteriespeichersystemen und der dadurch wachsenden Speicherdurchdringung behandelt der erste Teil der Untersuchungen die Auswirkungen von BSS zur Primärregelleistungsbereitstellung auf ein Verteilnetz.

Hierbei wurden sechs reale Ortsnetze (ON) aus dem MDN Netzgebiet als Basis für die Untersuchungen verwendet. Das im Netzberechnungstool aufgebaute Netzmodell ist schematisch in Abbildung 81 dargestellt. Die untersuchten sechs Ortsnetze unterscheiden sich bezüglich Netztopologie, Netzlänge, Anzahl der Lasten und PV-Anlagen sowie deren installierter Leistung. Ferner stellen die Ortsnetze typische Netzstrukturen auf dem Land bzw. in Dörfern dar. Für die Untersuchungen wurden vier Szenarien bezüglich der Anzahl von Speichersystemen im gesamten Netzmodell in Betracht gezogen – Szenario 0, 4, 10 und 36. In jedem Szenario wurden Lastflussberechnungen für zwei kritische Zeitpunkte durchgeführt. Der erste kritische Zeitpunkt entspricht der maximalen PV-Einspeisung mit positiver PRL von BSS, während der andere sich auf die maximale Last mit negativer PRL von BSS bezieht.

Die Ergebnisse der Lastflussberechnungen zeigen, dass weder in der Variante mit hoher PV-Einspeisung und positiver PRL von BSS noch in der Variante mit hohem Lastverbrauch und negativer PRL von BSS Spannungsbandverletzungen auftreten. Die maximal und minimal erreichten Spannungen betragen 1,06 pu bzw. 0,93 pu. Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Belastung einiger Ortsnetztransformatoren und Leitungen in der Mehrheit der modellierten Szenarien bei max. 80 % liegt. Es kommt lediglich in einer Variante zu einer Auslastung eines Ortsnetztransformators und einzelner Kabelabschnitte über 100%. Die maximale Auslastung der Kabel in den untersuchten Ortsnetzen bzgl. des Zeitpunkts mit hoher PV-Einspeisung und positiver PRL kann Abbildung 82 entnommen werden. Daraus geht hervor, dass die Szenarien S0-S10 keine kritischen Werte der Auslastung aufweisen. Bis auf die Leitungsauslastung in ON5 in S36 ist die Kabelauslastung in allen anderen Szenarien kleiner als 100%. Für einen kurzen Zeitraum ist der Betrieb mit einer Kabelauslastung über 100% zwar erlaubt, langfristig betrachtet wird sich dadurch jedoch die Restlebensdauer der Leitungen reduzieren.

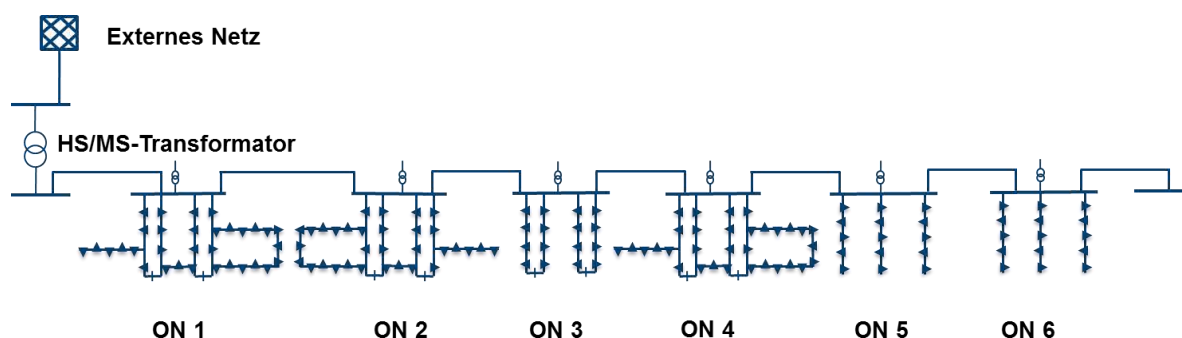


Abbildung 81: Modelliertes Netzmodell für die Analysen

Eine Bewertung kritischer Netzsituation, welche angesichts einer Speicherintegration in einem Verteilnetz auftreten, erfolgt meistens über deterministische Verfahren. Wie bereits erwähnt, sind Bestandteil der Betrachtungen dabei ein Stark- und Schwachlastfall. Der Starklastfall beschreibt den Zeitpunkt der höchsten Last bei niedriger Einspeisung. Hingegen für den Schwachlastfall gilt der Zeitpunkt der geringsten Last und der größten Einspeisung. Nachteil der Methode ist, dass kritische Fälle einzelner Betriebsmittel gegebenenfalls unberücksichtigt bleiben. In dieser Teiluntersuchung sollen daher kritische Netzsituationen bezüglich ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit mithilfe probabilistischen Verfahren ausgewertet werden. Dadurch ist eine detaillierte und kostensparende Netzplanung möglich.

Für die Untersuchungen wurde ein MS-Ring, wie in Abbildung 83 illustriert, bestehend aus neun Ortsnetzen der MDN und versorgt über ein externes Hochspannungsnetz, nachgebildet. Darin enthalten sind 937 Lasten (Haushalt, Landwirtschaft, Gewerbe), 167 PV-Anlagen und 50 BSS. Mithilfe des modellierten Netzgebietes werden dann zwei Szenarien untersucht. Das Ausgangsszenario S0 bildet das bestehende Netz ohne den Zubau von Speichern, wohingegen im Szenario S50 die gesamte Anzahl an BSS auf die NS-Netze aufgeteilt ist. Im Hinblick auf eine detaillierte Darstellung der Netzsituation ist den Verbrauchern, Erzeugern und Speichern realitätsnahe Last-, Einspeise- und Speicherprofile implementiert. Zusätzlich ist der Simulationszeitrahmen auf ein Jahr angesetzt.

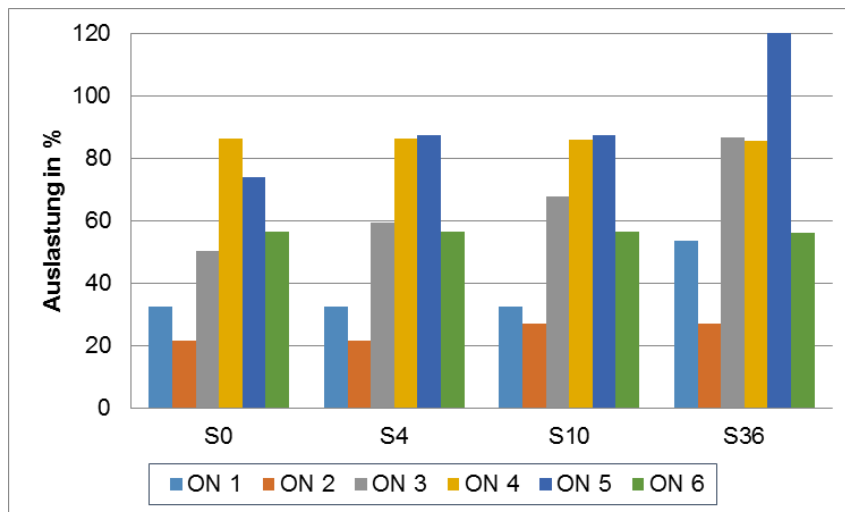


Abbildung 82: Maximale Auslastung der Leitungen in den Ortsnetzen

Aus der Gegenüberstellung von S0 und S50 sind aufgrund der Speicherintegration nur geringe Auswirkungen auf die MS-Ebene feststellbar. Demnach nimmt der gesamte Blindleistungsverbrauch mit 4,2% ab. Ebenfalls einen 5,7 prozentigen Rückgang verzeichnet die gesamte PV-Einspeisung aus den unterlagerten Netzen, welcher möglicherweise aufgrund höherer Verluste auftrat. An den insgesamt konstanten Spannungswerten der Mittelspannungssammelschienen (MS-SS) ist bei der MS-SS 4 die Spannung von 1,07 p.u. auf 1,06 p.u. gesunken. In den Ortsnetzen variieren dagegen die Spannungswerte etwas stärker, wobei eine Verschlechterung der Spannung nur in Ausnahmefällen auftritt. Generell bleiben die Minima der Spannungswerte infolge des Speichereinsatzes gleich oder werden gering angehoben. Positiv wirken sich Speicher, trotz der Regelleistungsbereitstellung auf die Netzbetriebsmittel, aus. Überwiegend sind die ONT in S50 gegenüber S0 weniger belastet. Maximal ist ein Rückgang am ONT 7 mit 13,5% zu verzeichnen. Ausnahme bildet hierbei ONT 2 der mit einem Faktor von 1,04 stärker ausgelastet ist.

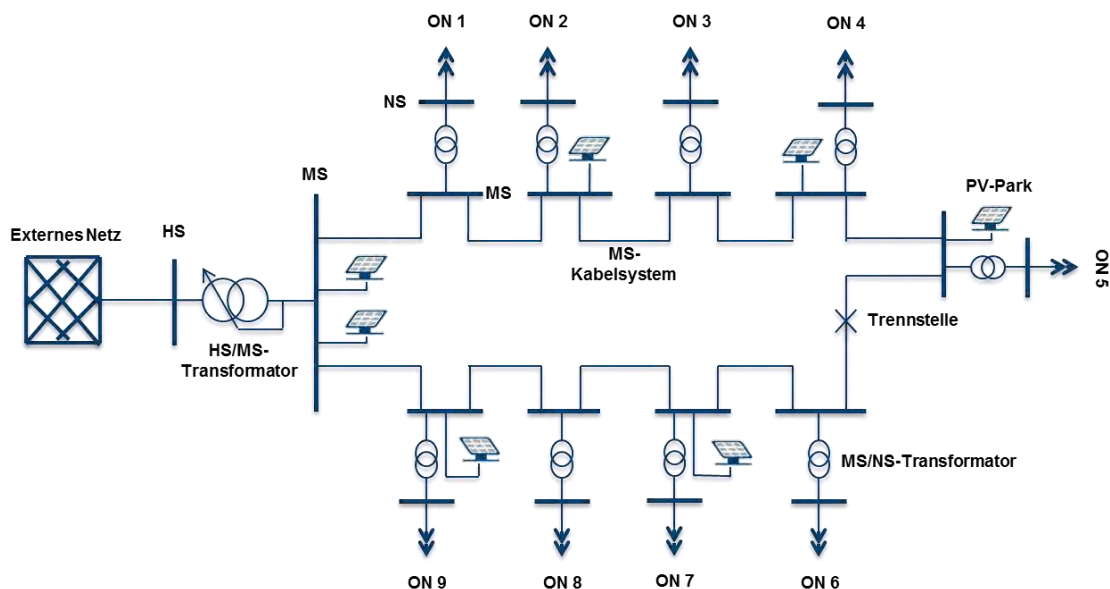


Abbildung 83: Schematischer Aufbau des modellierten Netzmodells

Sowohl Szenario S0 als auch S50 weisen keine Überschreitungen der Spannungs- und Auslastungsgrenzen auf. Folglich verursacht die Primärregelenergieerbringung keine kritische Netzsituation. In Bezug auf die betrachteten Knoten in den NS-Netzen treten im Vergleich zum S0 hohe Spannungen im S50 seltener auf. Die Wahrscheinlichkeit einer maximalen Spannung von 1,05 p.u. senkt sich um 3,1%. Hinsichtlich der Minimalspannung von 0,92 p.u. nimmt die Auftrittswahrscheinlichkeit mit 55% ab. Das Histogramm für das ON5 (siehe Abbildung 84) lässt den Schluss zu, dass sich die Knotenspannungen durch den Speichereinsatz häufiger bei 0,98 p.u. aufhalten.

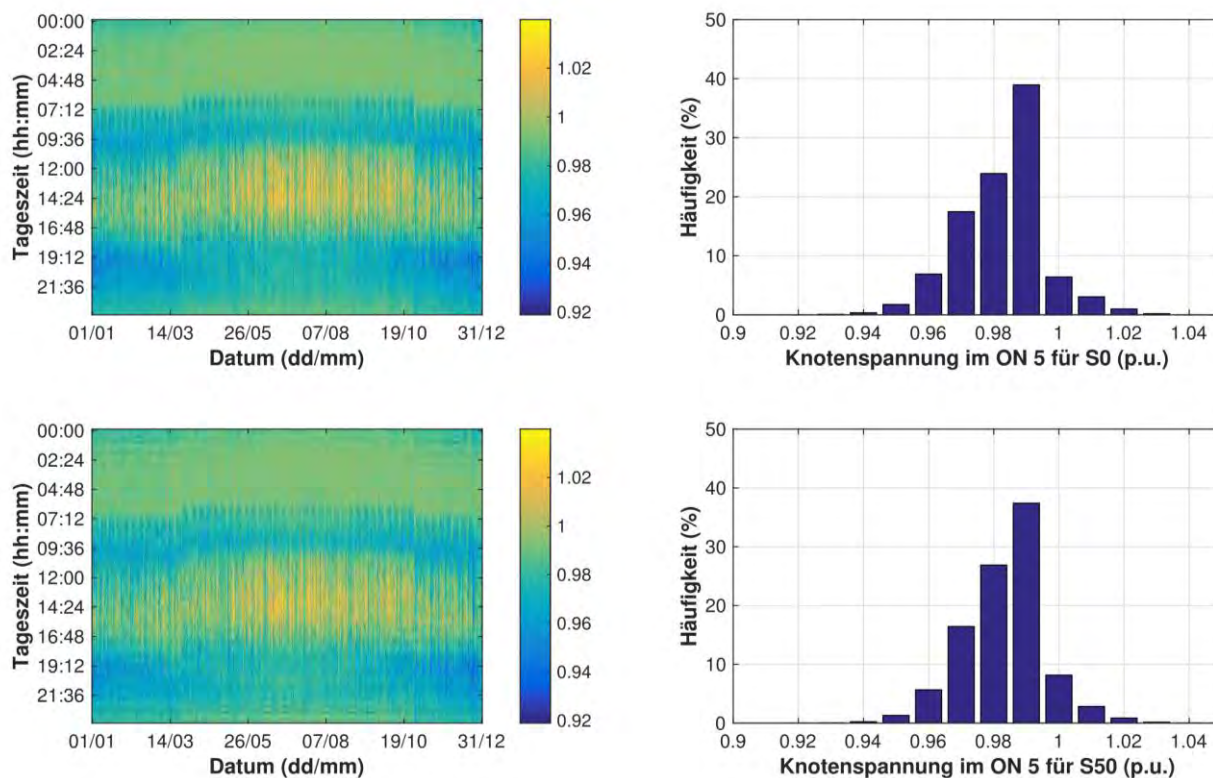


Abbildung 84: Thermobild und Histogramm der Spannung an einem Knoten im ON5 für S0 (oben) und S50 (unten)

Zudem ist die Auftretswahrscheinlichkeit der Spannungswerte von 0,92 p.u. und 1,04 p.u. verringert. Bestätigt wird dieses Erkenntnis an einem allgemein helleren Thermobildverlauf bezüglich des S50-Szenarios. So ist überwiegend in den ersten Stunden des Tages und den späten Abendstunden die grünliche Fläche mit deutlichen gelben Linien durchzogen. In diesen Stunden können Einflüsse von PV-Anlagen vernachlässigt werden, wodurch die BSS der Grund für den positiven Effekt auf die Spannungshaltung sind. Innerhalb der analysierten Leitungen weist S50 gegenüber S0 ebenfalls niedrigere Leitungsauslastungen auf, wobei sich die Wahrscheinlichkeit einer maximalen Auslastung von ca. 100% um den Faktor 2,45 reduziert. Eine Erhöhung der Leitungsauslastung von 49% auf 53% tritt im S50 mit dem Sechsfachen häufiger auf.

Eine Weiterführung der Untersuchungen kann darin bestehen, in den bereits verwendeten Szenarien eine Q(U)-Regelung zu integrieren. Dies bedeutet, dass in S0 die PV-Wechselrichter und in S50 die PV-Wechselrichter und das BSS eine spannungsabhängige Blindleistungsregelung implementiert werden muss. In den abgeschlossenen Simulationen wurde die Integration von BSS ohne Berücksichtigung der PV-Zubauprognose betrachtet. Im Zuge weiterer PV-Neuanlagen lässt sich auch die Anzahl der BSS steigern, womit deren Einfluss auf die Netze wächst. Infolgedessen können sich sogar Auswirkungen auf kleine Bereiche innerhalb der Hochspannungsnetze ergeben. Mit zunehmender Speicher-durchdringung, kann außerdem deren zukünftiger Einfluss auf Netzausbaumaßnahmen analysiert werden.

9.3 Frequenzregelverhalten in elektrischen Energiesystemen mit virtuellen Verbundspeichern

Aufgrund des Rückgangs konventioneller Erzeugungskapazitäten muss Regelleistung in Zukunft durch andere Alternativen bereitgestellt werden. Neben der Erhöhung des Selbstnutzungsgrades können BSS sowohl positive als auch negative Primärregelleistung erbringen und sind in der Lage, unmittelbar auf Frequenzabweichungen zu reagieren. Die Marktentwicklung der vergangenen Jahre zeigt einen starken und kontinuierlichen Zuwachs an installierter Leistung im Bereich der Lithium-Ionen-Batteriespeicher. Diese hat sich in Deutschland bis heute, im Vergleich zum Jahr 2000, um mehr als 300 MW erhöht. Dies bedarf Untersuchungen im dynamischen Modus (so-geannten RMS-Simulationen) zum Frequenzverhalten zukünftiger elektrischer Netze, in denen sich vermehrt BSS befinden werden, um die Leistungsfähigkeit des virtuellen Speicherkraftwerks beurteilen zu können.

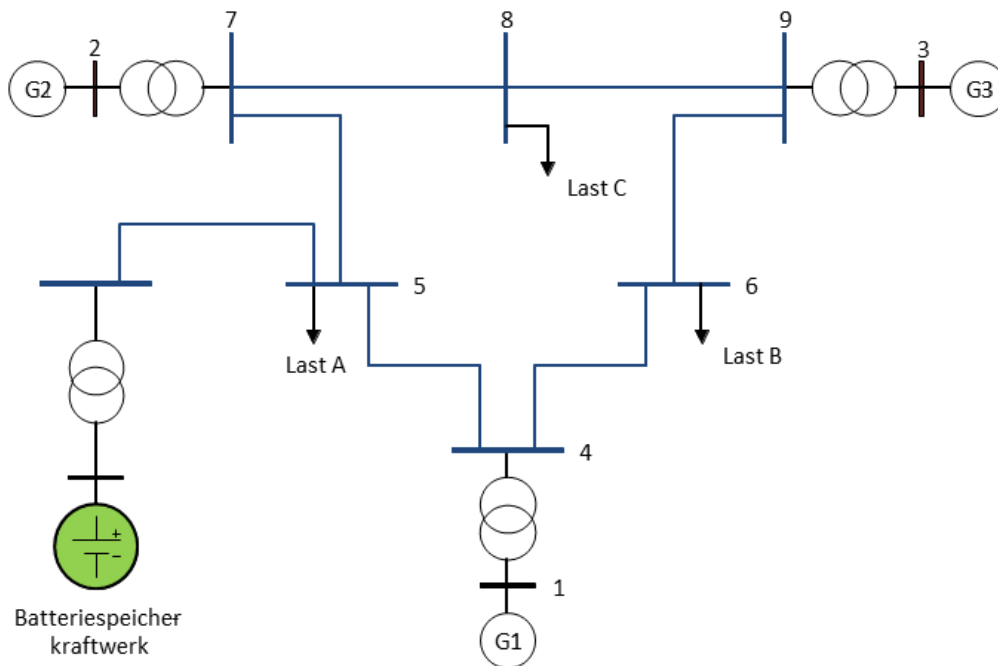


Abbildung 85: Überblick über das untersuchte IEEE-Netzmodell mit integriertem Batteriespeicherkraftwerk

Das Hauptaugenmerk des ersten Teils der RMS-Analysen liegt auf dem Betriebsverhalten eines Speicherverbundes mit Größen zwischen 1-35 MW in einem standardisierten Testnetz hinsichtlich eines Lastsprunges. Aus diesem Grund wurde zunächst ein IEEE-Testnetzmodell auf der Höchstspannungsebene implementiert, um eine bessere Vergleichsmöglichkeit der zu verwendenden Betriebsmitteldaten zu gewinnen. Das Netzmodell mit dem integrierten Batteriespeicherkraftwerk ist in Abbildung 85 illustriert. Es beinhaltet drei Generatoren, drei Transformatoren, drei Lasten, Leitungen und Sammelschienen. Der Verbundspeicher wurde an der Sammelschiene 5 über einen Transformator angeschlossen, um den Einfluss des Speicherkraftwerks auf die Frequenzhaltung zu bewerten.

Durch Simulationen mit einem relativen Lastsprung von 10 MW lässt sich folgern, dass die Reduktion in der Höhe des dynamischen Frequenzabfalls durch Einsatz der 1-35 MW BSS 10-70% gegenüber dem Referenzfall ohne Speicherverbund beträgt. Die Zeit bis zur Frequenzstabilisierung steigert sich um ca. 20-80%. Die Verläufe der Netzfrequenz für den Lastsprung sind in Abbildung 86 ersichtlich. Die entsprechenden Werte des Frequenzabfalls und die Dauer bis zum Erreichen einer stationären Frequenzabweichung sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Das Ziel des zweiten Teils der RMS-Simulationen ist die detaillierte Analyse der Frequenzregelung in elektrischen Netzen mit virtuellen Verbundspeichern bis zu 35 MW. Im Vordergrund stehen hierbei sowohl die Bereitstellung von Primär- und Sekundärregelleistung durch konventionelle Erzeugungsanlagen als auch die Teilnahme des Verbundspeichers an der Frequenzregelung. Neben einzelnen Lastsprüngen werden zudem Lastprofile über einen Zeitraum im Sekundenbereich simuliert, um den Einfluss des Speichersystems ermitteln zu können. Ebenso werden Erzeugungsszenarien angenommen, die die Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks bis ins Jahr 2050 abbilden. Abschließend werden das Frequenzregelverhalten und der Einfluss des Verbundspeichers hinsichtlich der getroffenen Erzeugungsszenarien analysiert.

Hierzu wurden drei Aufgabenbereiche festgelegt, in denen zunächst ein Übertragungsnetz mit passenden Betriebsmitteln und einem virtuellen Verbundspeicher modelliert wurden. Das modellierte Netz kann aus Abbildung 87 entnommen werden. Darüber hinaus wurden Primär- und Sekundärregelung durch konventionelle Erzeugungsanlagen und einen Verbundspeicher implementiert und die Frequenzregelung durch einzelne Lastsprünge auf ihre Plausibilität hin überprüft. Ebenso diente eine Lastflussberechnung zur Verifizierung des Testnetzes. Des Weiteren wurden für alle Lasten, die sich im Netz befinden, Lastprofile über einen Zeitraum von 300 Sekunden erstellt, um das Frequenzverhalten des Netzes und den Einfluss des Verbundspeichers zu ermitteln. Abschließend wurden vier Erzeugungsszenarien (E15, E20, E30 und E50) erstellt, die die Entwicklung des Kraftwerksparks in Deutschland bis ins Jahr 2050 abbilden sollen. Hiermit sollten die spezifischen Veränderungen der zukünftigen Energieversorgungsnetze, wie beispielsweise die Reduzierung der konventionellen Regelleistungsreserven und deren Auswirkungen auf das Frequenzverhalten, analysiert werden.

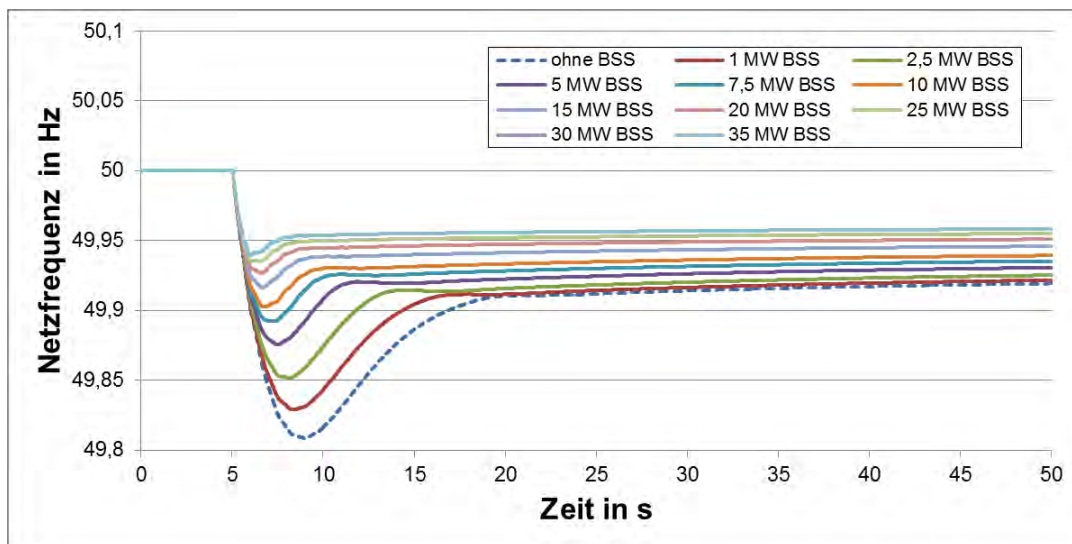


Abbildung 86: Frequenzverläufe nach einer Lastzunahme von 10 MW mit und ohne Speicherkraftwerk

Alle Untersuchungen wurden mit und ohne Berücksichtigung von PRL durch externe Netze durchgeführt. Hierzu können die spezifischen Leistungszahlen der externen Netze variiert werden, womit die bereitgestellte PRL der benachbarten Netze gesteuert werden kann. Ohne externe Regelung werden die Kraftwerksregelung und der Einfluss des Speichers innerhalb des betrachteten Testnetzes abgebildet. Wird die PRL von externen Netzen berücksichtigt, wird das Testnetz als Teil des kontinentaleuropäischen Verbundnetzes angesehen.

Tabelle 4: Dynamischer Frequenzabfall und Zeit bis zur Frequenzstabilisierung für unterschiedliche Größen von BSS

	ohne BSS	1 MW	2,5 MW	5 MW	10 MW	20 MW	35 MW
Max. Frequenzabfall (dyn.) in Hz	0,809	0,829	0,852	0,876	0,902	0,927	0,942
Zeit bis zum Abfangen der Frequenzabweichung in s	16,30	12,50	11,00	9,50	6,00	3,75	3,10

Anhand der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass Speicher das Frequenzverhalten in positiver Weise beeinflussen. In den Versuchen hinsichtlich eines relativen Lastsprungs von 50 MW kann die dynamische sowie die stationäre Frequenzabweichung mit steigender Speichergröße deutlich reduziert werden. Durch den Einsatz eines 35 MW-Speichers verringert sich die Frequenzabweichung um bis zu 15%.

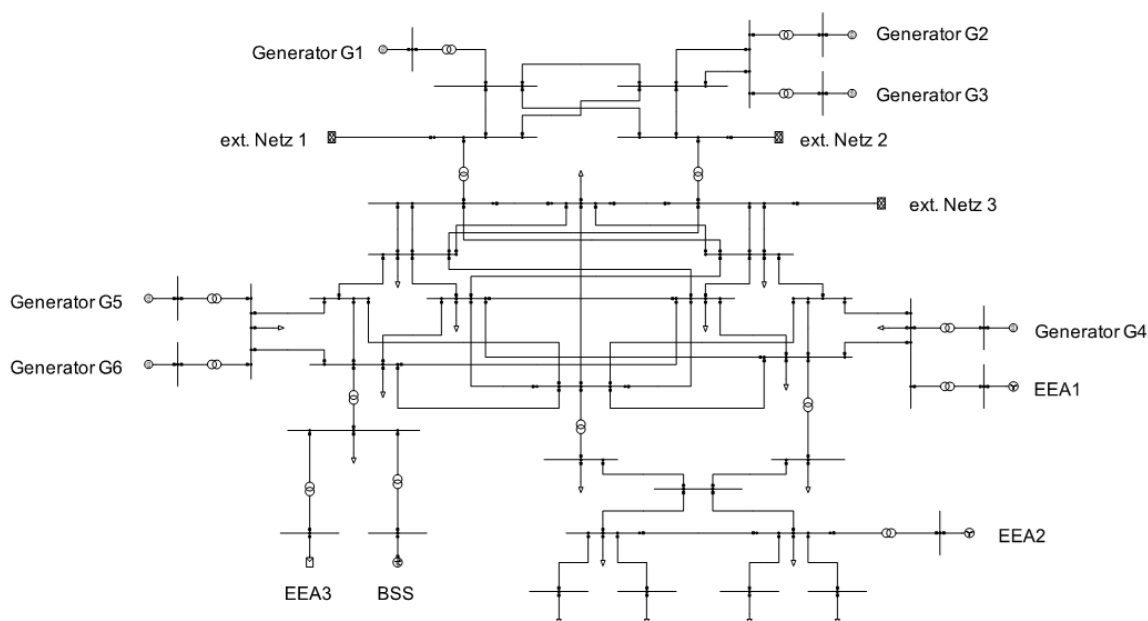


Abbildung 87: Integration von Haushaltsspeichersystemen im elektrischen Netz als Speicherverbund

Ebenso nimmt die benötigte Regelleistung durch konventionelle Kraftwerke ab, je mehr Leistung durch das Speichersystem bereitgestellt wird. Aufgrund der geringen Reaktionszeit (ca. 1,5 s) des Speichers wird das Leistungsungleichgewicht zudem schneller ausgeglichen, als ohne Einsatz von Speichern. Diese können mit Hilfe eines BSS um ca. 7% gesenkt werden.

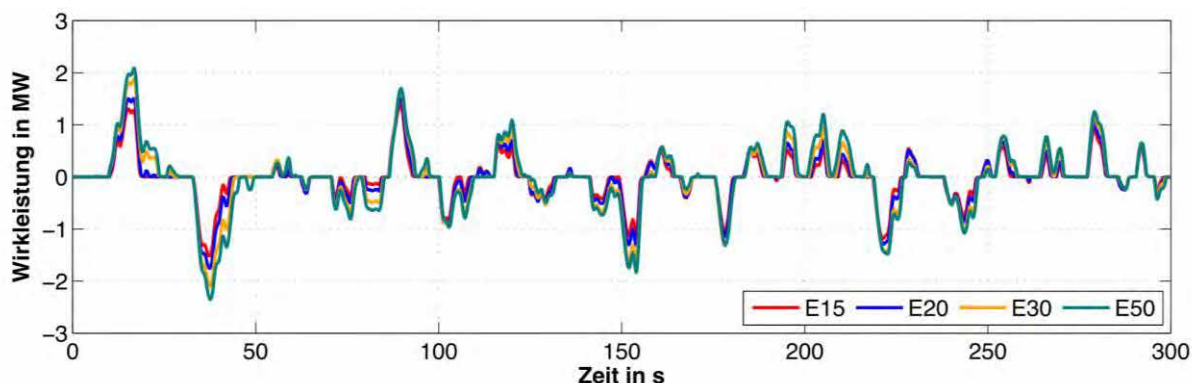


Abbildung 88: Leistungsverläufe des Verbundspeichers in den Szenarien mit BSS von 10 MW

Die auf Basis der Erzeugungsszenarien durchgeführten Analysen ergeben, dass Speicher in zukünftigen Energieversorgungssystemen an Einfluss gewinnen. Dies ist eine Reaktion auf die reduzierten Regelreserven sowie die geringe Systemträgheit dieser Netze. Aufgrund der geringen Zeit zur PRL-Erbringung durch BSS kann die Netzfrequenz innerhalb eines engen Bandes gehalten werden. Die Leistungsverläufe bzgl. der festgelegten Szenarien bei einer Speichergröße von 10 MW gehen aus Abbildung 88 hervor. Tabelle 5 stellt die Frequenzverteilung für die untersuchten Szenarien mit einem Speicherverbund von 35 MW dar. Eine größere Häufung von Frequenzwerten innerhalb des Totbandes der Regelung kann in den Zukunftsszenarien – E20, E30 und E50 – durch den Einsatz des Speichers erreicht werden. Im Szenario E50 liegt dieser Wert bei ca. 58 % gegenüber 70 % in E15. Die ermittelten Ergebnisse lassen daher die Schlussfolgerung zu, dass der Frequenzverlauf in derartigen Systemen größeren Schwankungen ausgesetzt ist. Der Speicher stellt vergleichsweise mehr Leistung bereit, wodurch sich signifikante Verbesserungen des Frequenzverlaufs ergeben.

Tabelle 5: Verteilung der Frequenzwerte (in Prozent) für die Erzeugungsszenarien mit BSS bei einer Speichergröße von 35 MW

Frequenzbereich	E15	E20	E30	E50
49,93 - 49,95 Hz	0,0	0,0	0,0	0,2
49,96 - 49,98 Hz	14,7	16,6	18,0	19,3
49,99 - 50,01 Hz	70,2	66,4	60,5	58,1
50,02 - 50,04 Hz	15,1	17,0	21,2	21,8
50,05 - 50,07 Hz	0,0	0,0	0,0	0,2

Diese Erkenntnisse wurden ohne Berücksichtigung von PRL mithilfe externer Netze gewonnen. Bei Betrachtung des Netzes als Teil des kontinentaleuropäischen Verbundnetzes ist die Regelung von außen zu stark, um den Einfluss des Speichers auf den Frequenzverlauf zu erkennen.

Untersuchungen bzgl. der Vernachlässigung des Totbandes von Verbundspeichern können durchgeführt werden. Hierbei sollen die Verbesserungen durch den Einfluss des BSS und dessen Beitrag zur Frequenzqualität ermittelt werden. Bei den vollzogenen Analysen wurden frequenz- und spannungsunabhängige Lasten verwendet. Die Frequenz- und Spannungsabhängigkeit von Lasten sollen auch betrachtet werden, um die einhergehenden Auswirkungen auf das Betriebsverhalten des Netzes näher zu untersuchen.

10 ENGiNe – das hybride Energiespeichernetz am EnCN

Im Zuge der steigenden Nutzung dezentraler, regenerativer Energieträger sind Stromspeicher eine Schlüsseltechnologie zur effektiven Selbstnutzung des erzeugten Stromes - unabhängig von politischen Rahmenbedingungen, zur Vermeidung von Netzengpässen im Verteilnetz und zur Umsetzung effizienter Inselnetze.

Das hybride Energiespeichernetz *ENGiNe* ist zukünftig ein integraler Bestandteil des Laboratoriums „Elektrische Energiesystemtechnik“ des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme am Standort Nürnberg. Es dient der Erforschung des Netzverhaltens unterschiedlicher elektrischer Speichertechnologien sowie insbesondere deren kombinierter Betrieb (Hybridspeicher). *ENGiNe* wurde unter anderem durch die zuvor beschriebenen Projekte *Smart-Grid-Solar (SGS)* und *Storage With Amply Redundant Megawatt (SWARM)* initiiert. Die darin gewonnen Erkenntnisse werden durch dieses Projekt inhaltlich fortgeführt.

Der schematische Aufbau sowie die Einzelkomponenten der Demonstrationsanlage sind gemäß des derzeitigen Planungsstandes in Abbildung 89 dargestellt.

10.1 Projektüberblick

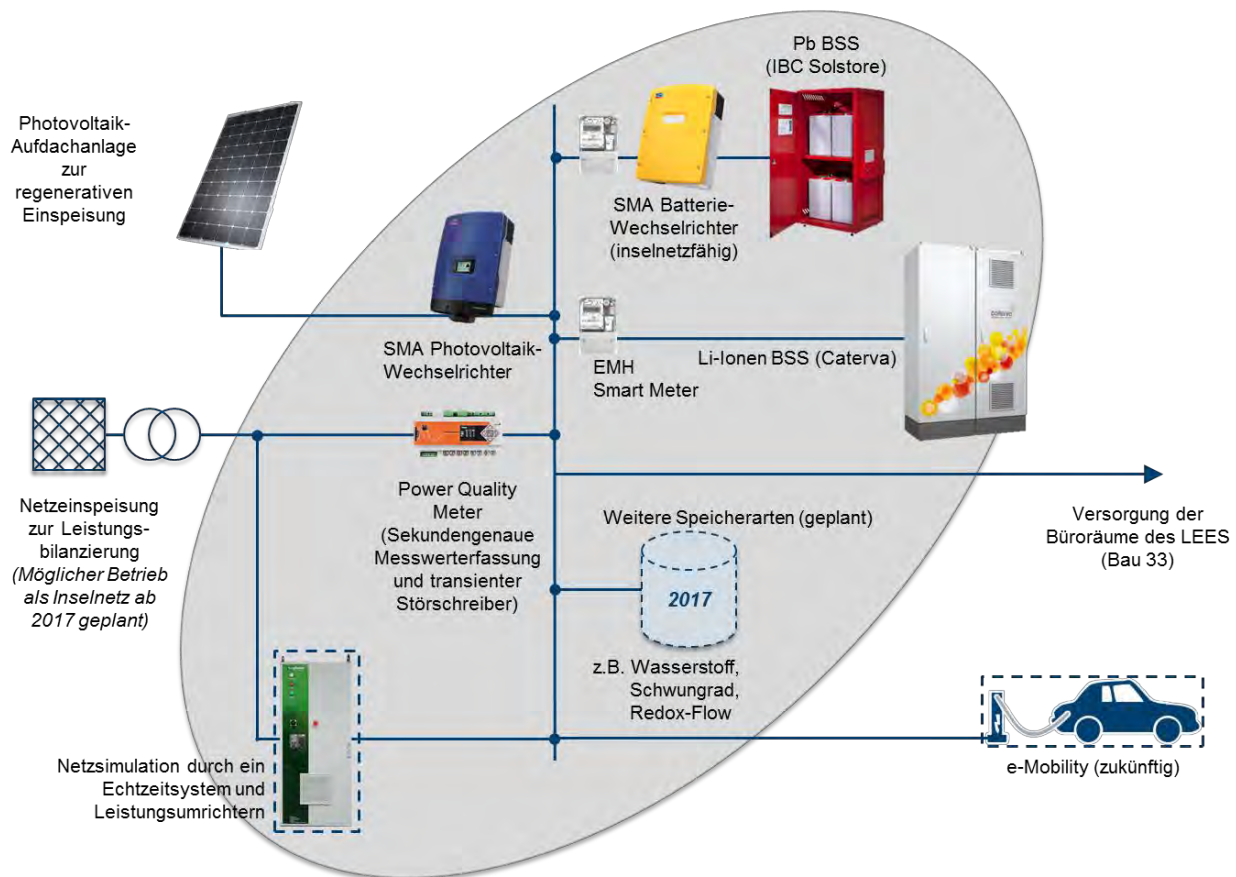


Abbildung 89: *ENGiNe* - das hybride Energiespeichernetz

10.2 Projektziele

Mit dem Projekt *ENGiNe* 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. Auf Basis eines Echtzeitsimulationssystems werden beliebige Last-, Speicher-, oder Einspeiseprofile bis hin zu kompletten Netzgebieten detailliert nachgebildet und in Kombination mit den realen Komponenten untersucht. Als Schnittstelle zwischen Simulation und Hardware dient ein hochdynamischer, bidirektionaler Leistungsumrichter. Erforscht wird dabei das Zusammenwirken der Einzelkomponenten (PV-Anlage, Last, Speicher) in verschiedenen Konstellationen zur Netzdienlichkeit, zur Erhöhung des Eigenverbrauchs oder auch zur Teilnahme am Regelenergiemarkt.

In der ersten Ausbaustufe soll eine PV-Anlage auf dem Dach des EnCN-Gebäudes (Bau 16 des AEG Geländes) mit einer Leistung von 16 kWp installiert werden. Gekoppelt wird ein 20 kW/ 21 kWh Lithium-Ionen Speicher und ein 4 kW/ 8 kWh Blei-Gel basierter Speicher. Die Speichersysteme werden in einem Brandschutz-Container in den Laborräumen des Lehrstuhls installiert. Als reale Last dienen die lehrstuhleigenen Büroräume im dritten Stock von Bau 33.

10.3 Aktueller Stand

Zur Auslegung der Anlage werden die Lastprofile der lehrstuhleigenen Büroräume über einen Zeitraum von einem Jahr erfasst. Dazu wurden hochauflösende digitale Energiezähler installiert. Aktuell erfolgt die schrittweise Inbetriebnahme erster Komponenten. Die Installation der Photovoltaik-Anlage ist für Anfang nächsten Jahres geplant. Anschließend kann ein Probetrieb der Gesamtanlage aufgenommen werden. Einen Überblick über die zeitlichen Abschnitte des Projektes zeigt Abbildung 90.



Abbildung 90: Zeitlicher Rahmen für das Projekt ENGiNe

Fortführung der Energiespeicherforschung am EnCN

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme führt die Forschung mit verschiedenen Projektpartnern auch über die 1. Phase des EnCN fort. Das Labor wird dabei, mit Drittmitteln finanziert, sukzessive um zusätzliche Elemente erweitert. Daher wird bereits in der Planungsphase ein möglichst modularer Aufbau sichergestellt. Für die Nutzung des Speicherlabors *ENGiNe* sind aus heutiger Sicht bereits Projekte mit einer Laufzeit bis 2026 vorgesehen.

Untersucht wird neben dem Netzverhalten gängiger und zukünftiger Energiespeicher eine sinnvolle Kombination unterschiedlicher Speichertypen zur Integration dezentraler regenerativer Energieanlagen. Weiteres Augenmerk gilt der Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Primärregelleistung) durch verteilte dezentrale Energiespeicher (virtuelle Schwarm Speicher). Auch das Betriebsverhalten von Mikro- und Inselnetzen ist Gegenstand zukünftiger Forschung mit dem Hybridspeichernetz *ENGiNe*.

11 Funktechnologien

11.1 Weitbereichssensornetzwerk

Im Rahmen der EnCN eine Lösung zur robusten, drahtlosen Erfassung von Sensordaten, wie vorzugsweise Energieverbrauchsdaten, und zur Nutzung in den lizenzfreien Bändern entwickelt. Die Herausforderung dabei war, unter den gegebenen regulatorischen Randbedingungen wie der maximalen Sendeleistung von 25 mW und einer maximaler Kanalbelegungszeit von 1 % die Koexistenz mit anderen Systemen in dem lizenzfreien Band zu gewährleisten und eine hohe Zuverlässigkeit über Distanzen größer 10 km im ländlichen Bereich zu realisieren.

Dazu wurde ein Verfahren entworfen, das ein Übertragungstelegramm in sehr viele kleine Subpakete unterteilt und mit zeitlichem Abstand auf unterschiedlichen Frequenzkanälen aussendet. Bei diesem sogenannten Telegrammsplitting-Verfahren werden die Subpakete so codiert, dass lediglich ein Teil der Subpakete empfangen werden muss, um die gesendete Information wieder zu dekodieren. Zur Erhöhung der Reichweite wird weiterhin die Datenrate auf wenige kbit/s reduziert, um so eine bessere Empfängerempfindlichkeit zu erzielen. Die Realisierung einer hohen Reichweite macht es möglich, mit einer Basisstation Sensordaten innerhalb eines großen Gebietes zu erfassen und somit die Kosten für die Netzwerkinfrastruktur zu reduzieren.

Das Verfahren wurde im Verlauf zu Low Power Wide Area Network (LPWAN) Lösung „MIOTY“ weiterentwickelt und prototypisch implementiert. Die Hauptaufgabe war dabei die Spezifikation der Wellenform und die Entwicklung der Empfängersoftware für eine Software-Defined-Radio (SDR) Plattform. Diese wurden zu einer Basisstation in einem 19 Zoll Gehäuse integriert. Als abgesetzte Sensorknoten wurden Module auf Basis kostengünstiger Sub-GHz Chipsätze aufgebaut und die Sendersoftware dafür entwickelt.



Abbildung 91: Basisstation der Fraunhofer LPWA Netzwerk Lösung MIOTY

Mit Hilfe der prototypischen Implementierung wurden Messungen im Labor und im Feld durchgeführt. Die Basisstationen sind an verschiedenen Standorten in Nürnberg und Erlangen fest installiert, unter anderem auch am Energiecampus auf dem Gelände der ehemaligen AEG, und können dort für Feldtests und Evaluierung von Pilotanwendungen auch über das Projekt hinaus genutzt werden. Mit dem installierten Netzwerk und den Sensorknoten wurden Feldtests durchgeführt, die zeigen, dass Reichweiten von 3-5 km im städtischen Bereich und bis zu 15 km in ländlichen Gegenden zuverlässig realisiert werden können. Messungen im Labor belegen die Störsicherheit des Verfahrens. Dabei wurden Störungen wie sie durch existierende Systeme im lizenzfreien Band entstehen nachgebildet und eine extrem hohe Funkkanalbelegung durch diese Systeme simuliert. Im Ergebnis zeigt sich eine nahezu unbeeinflusste MIOTY Übertragung bei einer Kanalbelegung durch Störungen von 40%. Diese hohe Störsicherheit erlaubt außerdem eine hohe Anzahl von mehreren 10.000 Teilnehmern in einem MIOTY Netzwerk.

Mit der im Rahmen des EnCN entstandenen prototypischen Implementierung konnten erste Industriekontakte zu verschiedenen industriellen Anwendern geknüpft werden, die mit dieser Lösung unter anderem Applikationen wie Metering und Monitoring der Netzqualität in Energieverteilungssystemen bedienen wollen. Erste Industrieprojekte zu Evaluation und Implementierung der Technologie sind bereits akquiriert. Durch die Nutzung der lizenzfreien Bänder bietet MIOTY eine kostengünstige Alternative zu Mobilfunk-M2M-Lösungen, insbesondere da diese Technologie auch einen für das Energiemanagement erforderlichen hohen Quality-of-Service liefert. Dies eröffnet ein großes Marktpotential auch außerhalb des Anwendungsbereichs Energiemanagement. Deshalb versucht das Fraunhofer IIS auch über das Projekt Energiecampus hinaus insbesondere durch Standardisierung die Technologie in den Markt zu bringen. Fraunhofer IIS ist Teil der in 2015 gestarteten ETSI die Standardisierungsaktivität „Low Throughput Networks (LTN)“.

11.2 Multistandard Klassifikator „Traffic Detective“

Die Nutzung von Funktechnologien nimmt in vielen Bereichen der Gebäudeautomatisierung, beim Energiemanagement, der digitalisierten Produktion und beim Metering stark zu. Speziell das lizenzfreie 868 MHz SRD (short range device) Frequenzband gewinnt hier zunehmend an Bedeutung, da es hinsichtlich der Durchdringung von Wänden und Decken wesentliche Vorteile gegenüber dem ISM Band bei 2,4 GHz bietet. Inkompatible Standards, wie ZigBee 868, EnOcean, M-Bus RF, KNX-RF, u.a. führen zukünftig dazu, dass es speziell durch Kanalüberbelegungen zu Engpässen und gegenseitigen Störungen kommen wird. Im Rahmen einer Promotion entstand in den vergangenen Jahren die Algorithmik eines merkmalsbasierten Klassifikators für Funkstandards im 868 MHz SRD Frequenzband. Dieser Klassifikator erkennt, basierend auf den Prinzipien der Mustererkennung, bei einem empfangenen Funksignals automatisch den jeweiligen Standard. Unter Verwendung des Klassifikators entstand in zunächst ein Prototyp einer App für Android-basierte Plattformen. Zielsetzung dieser Entwicklung ist es dem Planer und Servicetechniker ein einfach zu bedienendes Werkzeug an die Hand zu geben, welches ihm ermöglicht bereits bei der Planung die Auslastung der Funkkanäle vor Ort zu erfassen oder im Falle der Fehlersuche eine vor Ort Analyse durchzuführen.

Aufbauend auf die Algorithmen die aus der Promotion erfolgte die Anpassung, Weiterentwicklung und Verifikation der Algorithmen mittels Matlab-Simulationen für den Einsatz im Traffic Detective. Dazu erfolgte die prototypische Umsetzung auf einem Android Tablett-PC statt. Als RF-Front-End kommt ein handelsüblicher DVB-T Empfänger zum Einsatz (siehe Abbildung 92).

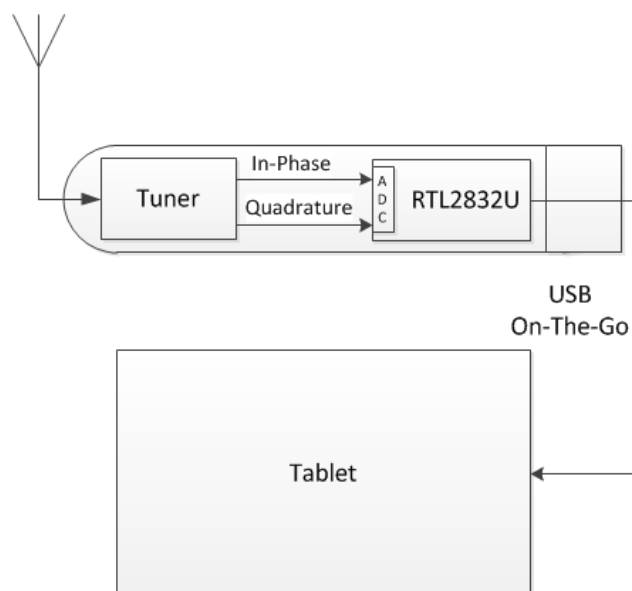


Abbildung 92: Schematische Darstellung des Traffic Detective

Der entstandene Traffic Detective ist ein kostengünstiges Funkanalysewerkzeug, welches die gängigsten Standards im 868 MHz Frequenzband erkennt und die zeitliche Belegung der Funkkanäle durch den jeweiligen Standard. Folgende Standards können damit erkannt werden: IEEE 802.15.4, DIN EN 13757-4 und ISO/IEC 14543-3-10, die unter anderem bei ZigBee, Wireless M-Bus, KNX RF und dem EnOcean Protokoll verwendet werden. Der Traffic Detective kann die zeitliche Belegung der Funkkanäle durch die jeweiligen Standards erkennen und visualisieren (Abbildung 93). Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt durch Lizenzierung der Software an Kunden und die Durchführung kundenspezifischer Anpassungen in zukünftigen Entwicklungsprojekten.

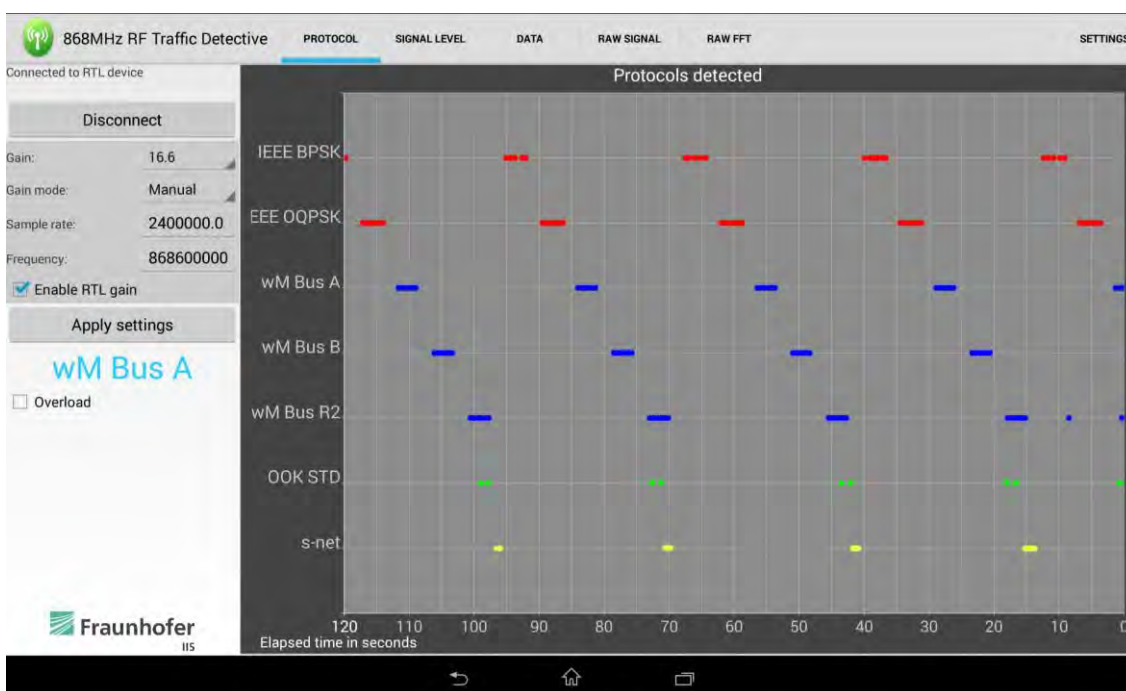


Abbildung 93: Visualisierung erkannter Standards und Kanalbelegungsdauer

Der Traffic Detective wurde auf dem wireless congress 2014 und der embedded world 2015 einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Erste Kundenanfragen zeigten eine äußerst positive Resonanz. Erste Evaluationslizenzen konnten an interessierte Kunden vergeben werden. Das Feedback dieser bestätigte, dass es derzeit eine Marktlücke für eine derartige Technologie gibt. Es besteht Interesse an einer einfach handhabbaren und kostengünstigen Lösung für die schnelle Vor-Ort-Analyse der ISM- bzw. SRD-Funkbänder. Interessiert an der Technologie sind vorrangig Unternehmen, die Komponenten oder Systeme für den Bereich Metering oder Sicherheitstechnik (Alarmanlagen) mit Funkanbindung vertreiben. Als zusätzliche Kundengruppe sollen die Hersteller von

Messgeräten erschlossen werden. Für sie kann der Traffic Detective eine Ergänzung zu teuren und relativ komplexen Messgeräteleösungen darstellen. In den vergangenen Jahren zeigte sich aber auch, dass der Einsatz von kommerziellen Empfängern aus dem Massenmarkt (DVB-T Empfänger) einem ständigen Wandel unterliegt, d.h. die Verfügbarkeit derartiger Lösungen ist immer nur für einen bestimmten Zeitraum gegeben, sodass die Entwicklung eines geeigneten Empfängers in Zusammenarbeit mit einem Messgerätehersteller auch aus diesem Grund anzustreben ist.

12 Power Line Technologien

Power Line Communication (PLC) bezeichnet die Übertragung von Information über das Leitungsnetzwerk des Stromnetzes. Gegenstand der Betrachtungen sind sogenannte Schmalband-PLC-Verfahren, welche im intelligenten Stromnetz (Smart Grid) zunehmend an Bedeutung gewinnen. In drei Einzelprojekten wurden verschiedene Aspekte von PLC-Verfahren betrachtet.

12.1 Leistungseffiziente Schmalband-Powerline Kommunikation

Ausgehend von einer zu Beginn durchgeführten Messkampagne zur Ermittlung des Leistungsverbrauchs kommerziell verfügbarer Powerline Communication (PLC) Modems [52] konnte ein Bedarf nach leistungseffizienten Technologien zur Datenübertragung über konventionelle Stromkabel festgestellt werden. Zahlreiche Anwendungen im Rahmen derer PLC als Übertragungstechnologie eingesetzt wird verursachen nur relativ geringe und eher selten auftretende Datenmengen, die einen in [1] festgestellten Leistungsverbrauch nicht rechtfertigen.

Die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten reichen von der Evaluierung verschiedener Übertragungstechnologien vor dem Hintergrund der Störfestigkeit sowie der algorithmischen Komplexität und damit zusammenhängend des erzielbaren Leistungsverbrauchs über die Entwicklung realistischer Kanalmodelle, konkreter Übertragungsverfahren, Koppelschaltungen mit adaptiver Impedanzanpassung bis hin zu prototypischen Implementierungen.

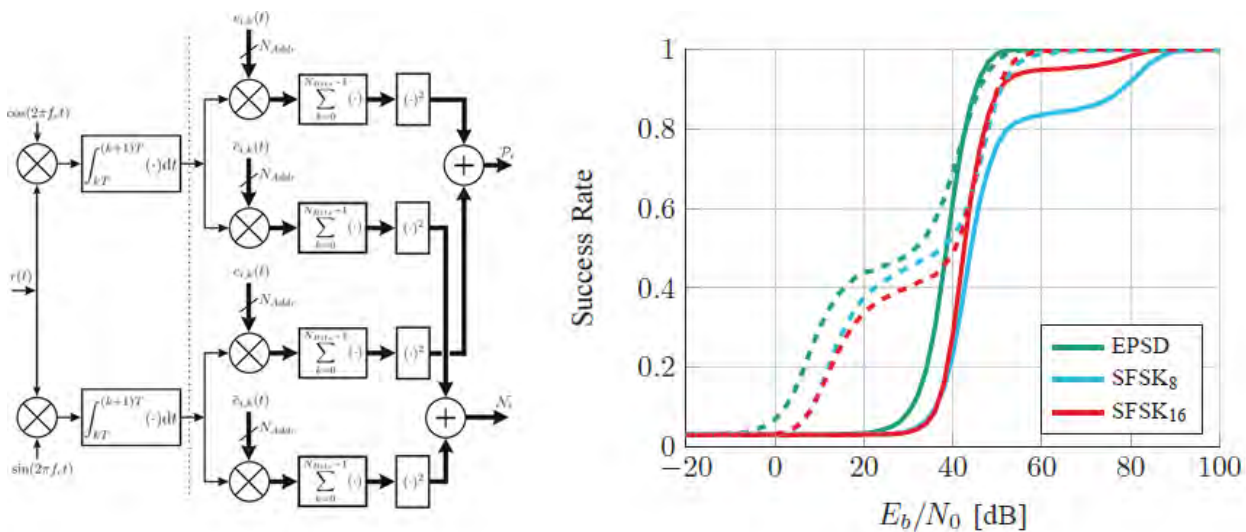


Abbildung 94: Teil-Blockschaltbild des entwickelten Empfangsverfahrens und Erfolgsquote des Verfahrens („EPSD“) gegenüber dem Stand der Technik („SFSK“) für Datenraten von 1 kbit/s (durchgezogene Linien) und 10 kbit/s (gestrichelte Linien)

In diesem Kontext entstand ein algorithmisch hocheffizientes Verfahren für den Empfang FSK-modulierter Daten, das sich als äußerst robust gegen typischerweise in PLC-Kanälen auftretende Störer erweist (Abbildung 94). Für dieses Verfahren wurde 2016 ein US-Patent erteilt [12]. Im Zuge dessen wurden zahlreiche Erweiterungen und Optimierungen des Verfahrens untersucht und teilweise im Rahmen von IEEE-Konferenzen veröffentlicht [53][54], die sich u.a. um die weitere Verbesserung der Störfestigkeit, eine effiziente Empfängersynchronisation, eine Adaption für einphasige sowie mehrphasige Stromnetze sowie die Anpassung auf DC-Netze drehen. Das entstandene Kanalmodell (siehe Abbildung 95) enthält sämtliche Kanaleffekte, die in der schmalbandigen PLC-Übertragung bekannt sind, und basiert auf den aktuellsten Erkenntnissen aus der wissenschaftlichen Literatur. Das Modell lässt sich äußerst einfach in eine Matlab-Simulationsumgebung einbinden. Bezüglich der weiteren Verbesserung der Störfestigkeit wurden u.a. verschiedene Verfahren zum Ausweichen von zyklisch-stationär auftretenden Störprozessen untersucht [54] (Abbildung 96). Zudem wurden optimale Spreizcodes gefunden, die sich einerseits sehr recheneffizient in das Gesamtkonzept integrieren lassen und andererseits die Robustheit gegenüber Schmalbandstörern signifikant steigern können. Bezüglich der Adaption auf einphasige und mehrphasige sowie DC-Netze wurden Untersuchungen bezüglich der zu verwendenden Trägerfrequenzen durchgeführt und verschiedene Detektions- und Synchronisationsverfahren entwickelt. Diese wurden auf Basis der De-

tektions- und Estimationstheorie hergeleitet und zeichnen sich durch äußerst geringen algorithmischen Aufwand aus, zeigen jedoch nur unwesentlich geringere Erfolgswahrscheinlichkeiten als äußerst rechenaufwendige Optimallösungen (Abbildung 97). Um den Always-On Leistungsverbrauch der Empfänger weiter zu reduzieren, wurde ein mehrstufiges Aufweckverfahren entwickelt, das sich durch äußerst geringen Rechenaufwand im sogenannten Standby-Betrieb auszeichnet, also immer dann, wenn der Empfänger auf den Empfang eines Datenpakets wartet. Was die Kopplung des Sender-Empfängersystems an das Stromnetz angeht, so konnte festgestellt werden, dass ein adaptives Verfahren zur Impedanzanpassung mit relativ geringem Bauteilaufwand Steigerungen der übertragbaren Signalleistung gegenüber Nichtanpassung und Technologien aus dem Stand der Technik von bis zu 8 dB bewirken kann, wie in Abbildung 98 zu sehen.

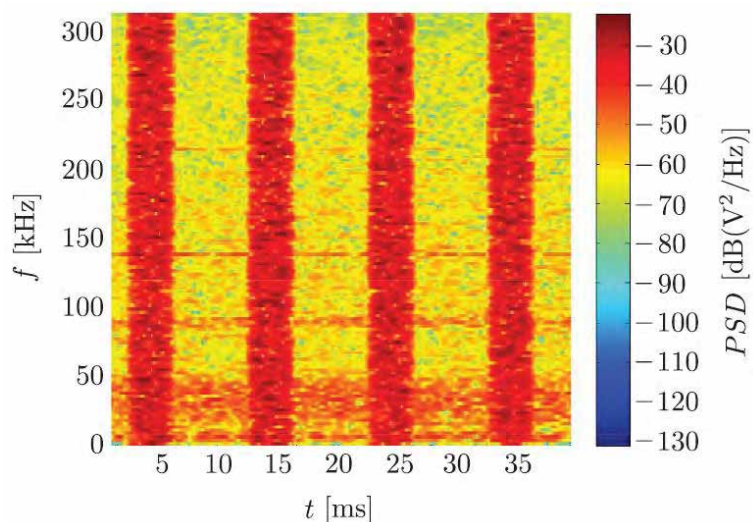


Abbildung 95: Rauschspektrum des entwickelten Kanalmodells

Die entwickelten Verfahren und Konzepte finden überall dort Anwendung, wo Daten nur gelegentlich und mit relativ geringen Datenvolumina übertragen werden sollen und die Powerline Kommunikation gegenüber konventioneller drahtgebundener oder funkbasierter Übertragung Vorteile aufweist, etwa weil die Installation dedizierter Kommunikationsleitungen nicht möglich oder zu teuer ist und die Funkübertragung bspw. aufgrund von dämpfenden Elementen (Wänden etc.) nicht möglich ist. Konkrete Anwendungsbeispiele sind hierbei die Übertragung von Metering-Daten oder anderer Sensor- oder Steuerdaten die nur gelegentlich anfallen, sowie das bedarfsgerechte Aufwecken breitbandiger PLC-Empfänger mit entsprechend großem Leistungsverbrauch.

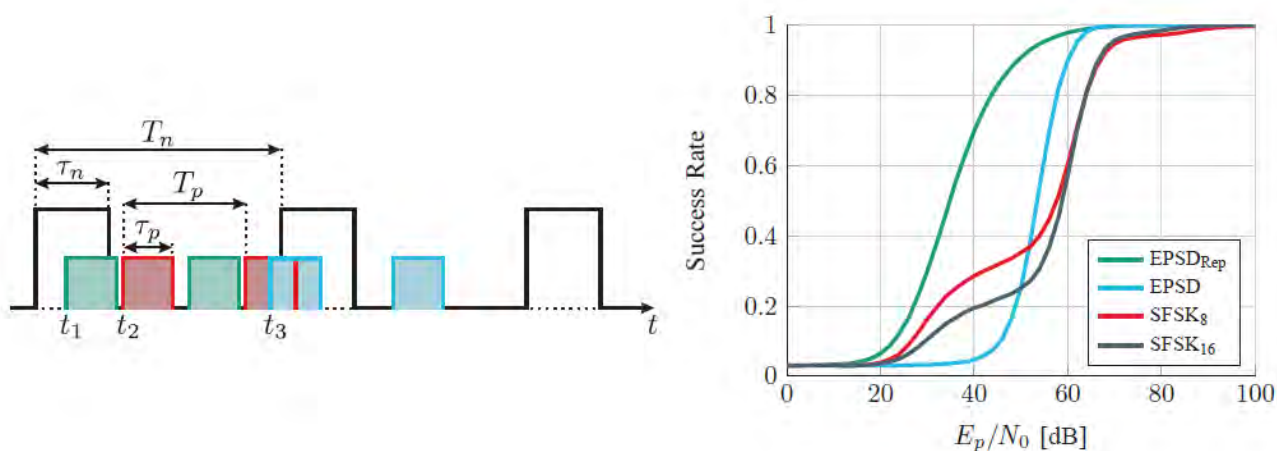


Abbildung 96: Steigerung der Erfolgsquote durch gezieltes Ausweichen zyklische-stationärer Störer („EPSD_{Rep}“)

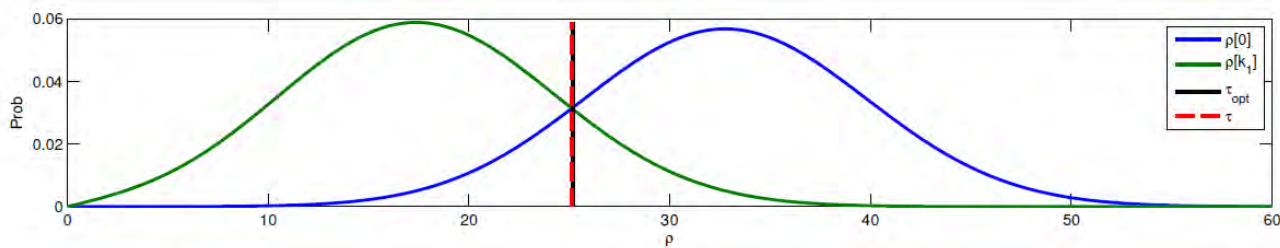


Abbildung 97: Ermittlung des optimalen Synchronisationsschwellwertes τ_{opt} anhand von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sowie des deutlich weniger rechenintensiven approximierten Schwellwertes τ

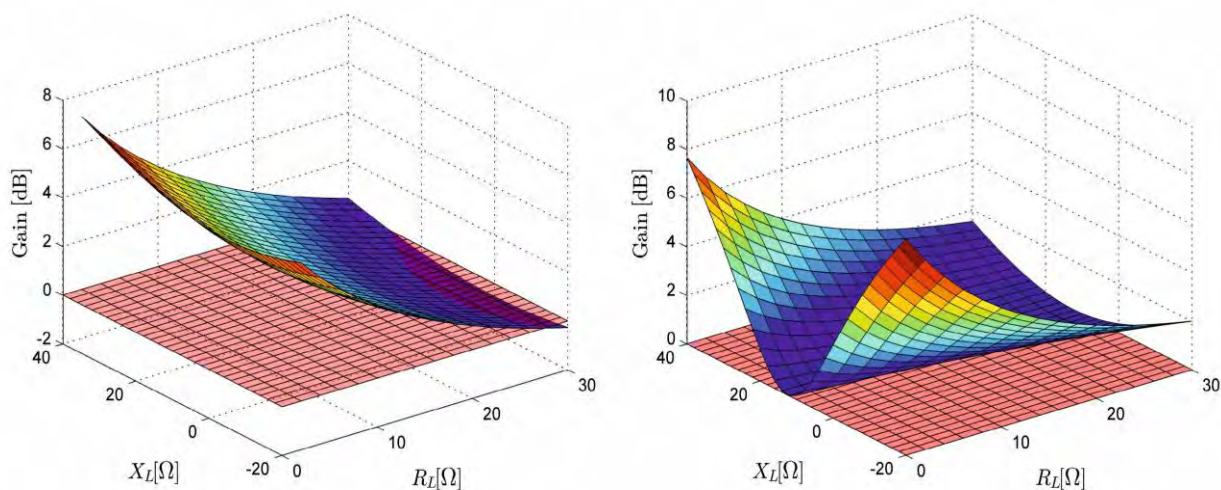


Abbildung 98: Gewinne der entwickelten adaptiven Impedanzanpassung gegenüber Nichtanpassung (links) bzw. Lösungen aus dem Stand der Technik (rechts)

12.2 Power Line Communication für harsche Betriebsumgebungen

In Zusammenarbeit mit einem regionalen mittelständischen Unternehmen wurden PLC-Verfahren für den Einsatz in industriellen Anlagen betrachtet. Ziel war der kosteneffiziente Austausch von Sensorinformationen, welche an verteilten Messstellen von verschiedenen Sensoren erfasst, gebündelt über gemeinsam über existierende Stromleitungen übertragen werden (Abbildung 99).

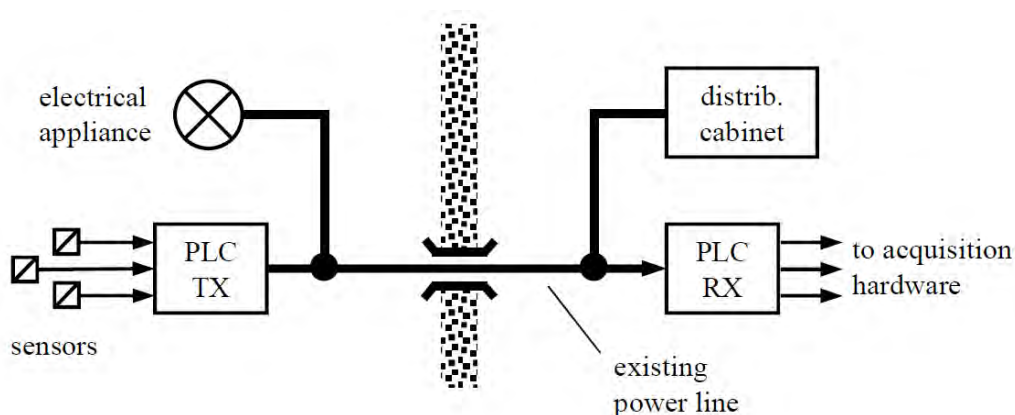


Abbildung 99: Architektur der PLC Übertragungsstrecke in einer industriellen Anlage

Zunächst wurde ein PLC optimiertes Netzfilter entworfen[55], welches speziell für die effiziente und experimentelle Entwicklung von PLC-Verfahren in Laborumgebungen geeignet ist (Abbildung 100). Das Filter zeichnet sich durch eine besonders hohe Gegenaktunterdrückung in dem relevanten PLC-Frequenzbereich von 3-500 kHz aus, sodass Netzabschnitte signaltechnisch „isoliert“ werden können (Abbildung 101).

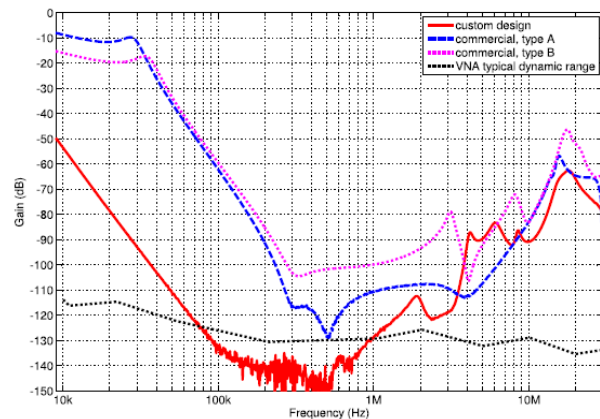
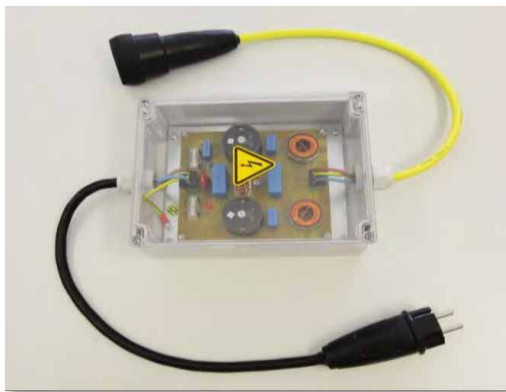


Abbildung 100: PLC optimiertes Netzfilter (links) und dessen Frequenzgang für Gleichtaktstörungen (rechts)

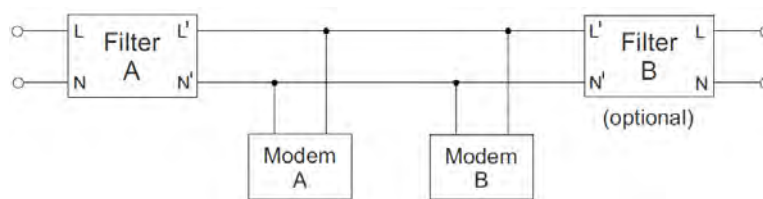


Abbildung 101: Architektur der PLC Versuchsstrecke mit Netzfiltern

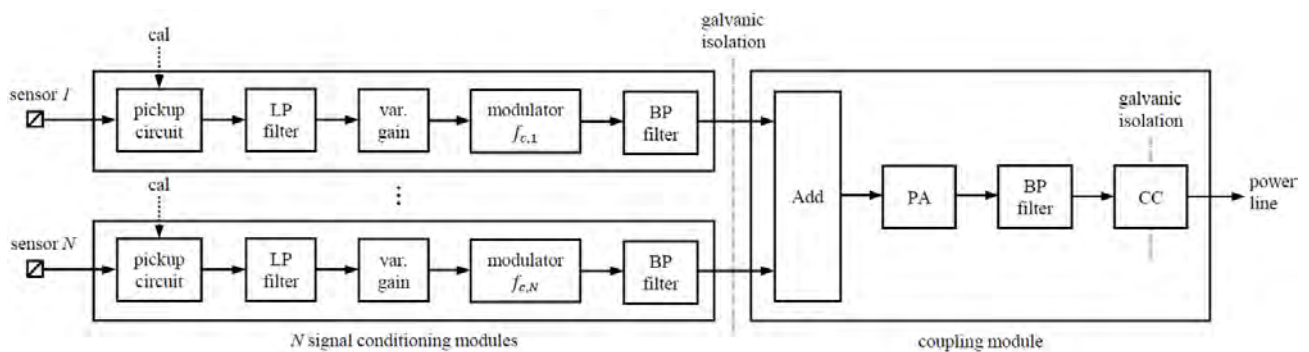


Abbildung 102: Architektur PLC-Transmitters

Besonderes Merkmal des Projekts war die Auslegung der PLC-Modems an harsche Betriebsumgebungen, wodurch besondere Anforderungen an die Auslegung der Elektronik auf Schaltungsebene entstehen (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Skalierbarkeit). Dies wurde durch Abwägungen auf System- und Schaltungsebene in der Architektur des PLC-Systems berücksichtigt (Abbildung 102). Es wurde ein Systemdemonstrator integriert und in Labor- sowie Feldversuchen erfolgreich getestet. Die damit erzielten Ergebnisse wurden entsprechend publiziert [56].

12.3 Chip-Design für energieeffiziente Power Line Leistungsverstärker

Im Rahmen eines weiteren Projekts mit einem regionalen Unternehmen wurden energieeffiziente Leistungsverstärker für Power Line Communication untersucht, welche gemeinsam mit peripheren Schaltungsteilen auf Chipebene integriert werden.

Der Forschungsschwerpunkt lag auf der Effizienzsteigerung der Betriebs- bzw. Ruhestromaufnahme von PLC-Modems durch den Einsatz der Class-D Verstärkertechnik. Der vergleichsweise schlechte Wirkungsgrad von ca. 50 % bei herkömmlichen Verstärkern kann durch die Verwendung von Class-D Technik auf ca. 90 % gesteigert werden. Dies geht jedoch auf Kosten einer deutlich komplexeren Ansteuerung innerhalb der Verstärkerstufe. Das Hauptaugenmerk lag in der Entwicklung eines Testchips, dem Entwurf eines Prototyps sowie der Auswertung von Messergebnissen des ersten Prototypen und des Testchips.

Es konnten eine Vielzahl an technologischen Fragestellungen beantwortet werden, die für den Entwurf des eigentlichen Prototyps von entscheidender Bedeutung sind. Die Isolationseigenschaften der Metall-Metall-Isolierung stellen demnach kein Problem dar, wodurch das Layout sehr erleichtert wurde. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Designregeln im Fertigungsprozess Schwächen aufweisen, die einen Betrieb bei Spannungen > 10V verhindern. Dies führte zu einer Neudefinition der Wann-

Abstandsregeln für die verwendeten LDMOS-Transistoren. Bis auf die Spannungseinschränkung durch den problematischen Wannen-Wannen-Abstand sind alle gemessenen Komponenten des Testchips funktional. Die gemessenen Komponenten sind das komplette Referenzsystem, die Takterzeugung, der Temperatursensor sowie die Pegelwandler. Der finale Prototyp mit allen gewünschten Funktionalitäten und Layoutanpassungen wurde fertiggestellt und gefertigt. Der 36mm² große Chip (Abbildung 103) enthält zwei Halbbrücken, drei DC-DC-Wandler, sieben Temperatursensoren, vier Spannungsregler, ein Breitbereichsreferenzsystem, eine Phasenregelschleife, elektrisch programmierbare Sicherungen zur Konfiguration, Power-Managementfunktionen sowie einen umfangreichen Digitalteil des Projektpartners.

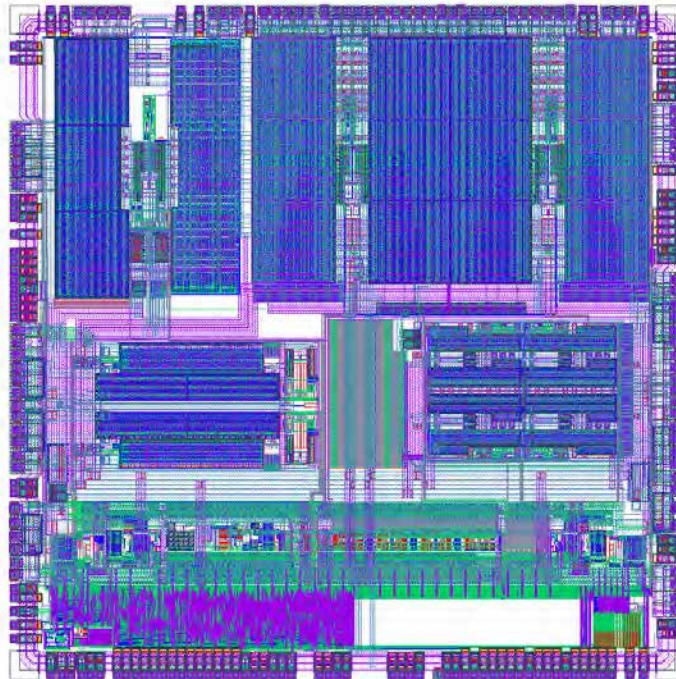


Abbildung 103: Chiplayout für einen PLC Klasse-D Leistungstreiber inkl. Peripherie

13 Systeme und Anwendungen

13.1 OGEMA Software Framework

Im Rahmen eines Drittmittelprojekts wurden grundlegende Elemente des OGEMA (Open Gateway Energy Management) Frameworks zusammen mit Partnern entwickelt. Einen Eindruck von den in OGEMA enthaltenen Komponenten vermittelt Abbildung 104. Zu dieser im Grundprojekt als Open Source entstandenen Version wurden verschiedene Verbesserungen und Erweiterungen konzipiert und umgesetzt, die zukünftig in einer Professional Variante angeboten werden sollen.

Für den Einsatz von OGEMA in kommerziellen Systemen stehen bei den Anforderungen hohe Betriebsstabilität und gute Systemperformance an erster Stelle. Durch Optimierungsarbeiten konnte erreicht werden, dass OGEMA auch auf Embedded Systemen mit reduzierter Leistungsfähigkeit zuverlässig und stabil betrieben werden kann. Dies kann für Anwendungen mit wenigen Schnittstellen sogar ein Raspberry PI sein, ein vollständiger Einplatinencomputer für etwa 30 Euro.

Weitere im Rahmen des EnCN umgesetzte Erweiterungen setzten an verschiedenen Stellen an. Eine wichtige Entwicklung betraf das Kommunikationsprotokoll KNX, das am weitesten verbreitete Bussystem für den Heimgebäudebereich. Um dieses Bussystem kostengünstig an OGEMA anzubinden, wurde ein Treiber für die direkte Ansteuerung eines preisgünstigen USB-Sticks geschrieben. Zusätzlich können nun die in dem KNX-Planungstool ETS erstellten Netzwerkplanungen direkt in OGEMA importiert werden, so dass innerhalb von OGEMA weitere Konfigurationsarbeiten entfallen.

Um die Nutzerfreundlichkeit für den Programmierer von Anwendungen zu steigern, entstanden verschiedene Softwaremodule. Sie ermöglichen eine intuitivere Bedienung von OGEMA durch technische Laien. Programmierer können OGEMA-Anwendungen leichter erstellen. So kann der Nutzer mit Hilfe verschiedener webbasierter graphischer Oberflächen den Aufbau der internen Datenbank für Ressourcen und Datenpunkte sowie die Vergabe von Sicherheitsrichtlinien und Rollen definieren. Einfache Programme werden ohne komplexe Entwicklungsumgebungen auf Basis von Javascript erstellt.

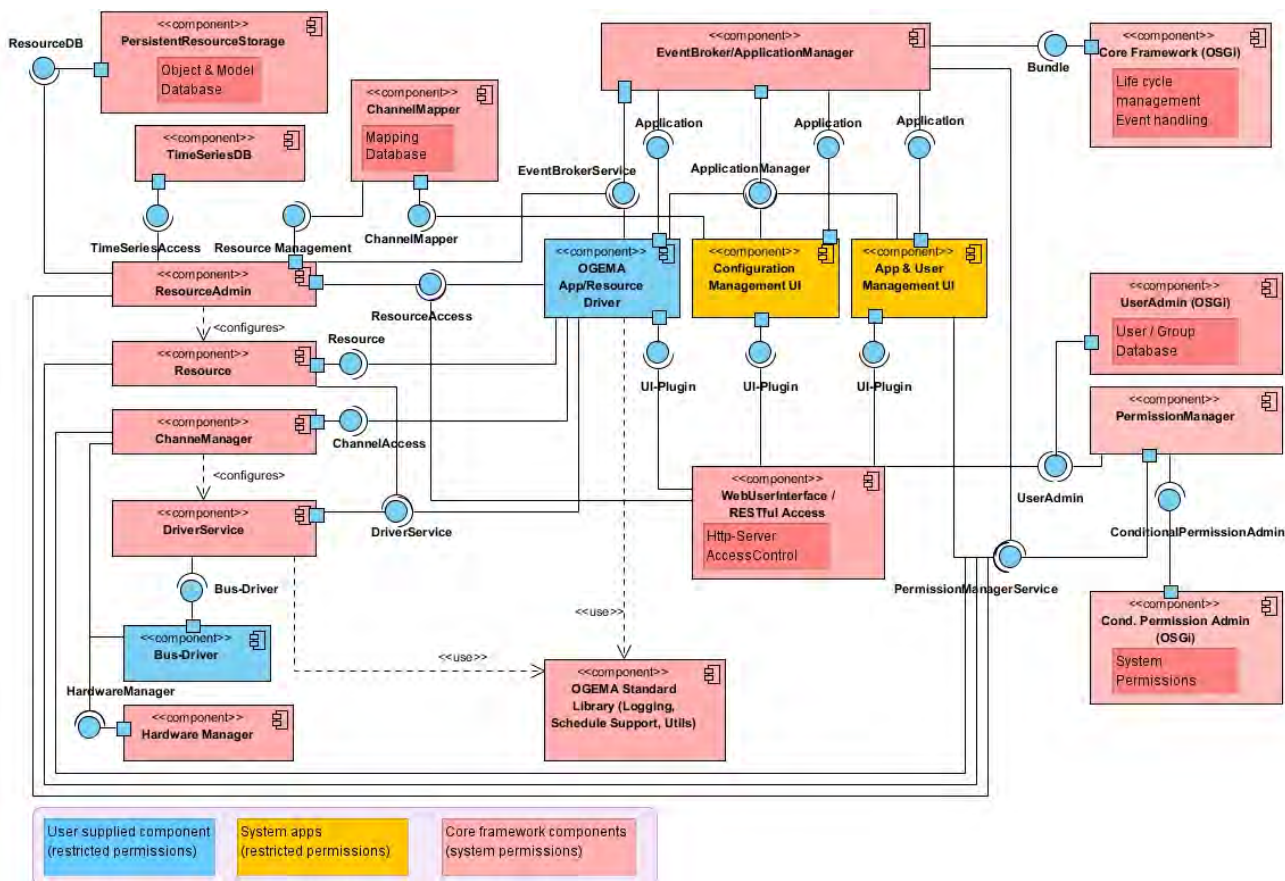


Abbildung 104: Komponenten des OGEMA Frameworks

Weitere Arbeiten erfolgten im Bereich Security. So entstand ein App-Loader (Abbildung 105), der auf Basis von Zertifikaten das sichere Laden von OGEMA Apps unterstützt. Beim Ladevorgang kann das Sicherheitsniveau nun so eingestellt werden, dass der Loader selbst den Entwickler einer App identifizieren und im Zweifelsfall den Ladevorgang verweigern kann. Um OGEMA für Energiemanagement im Bereich Industrie 4.0 einsetzen zu können, erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma Infoteam die Integration einer softwarebasierten SPS. Dies ermöglicht die Verbindung von Cloud- bzw. Fog-Computing mit echtzeitfähiger Steuerungstechnik.

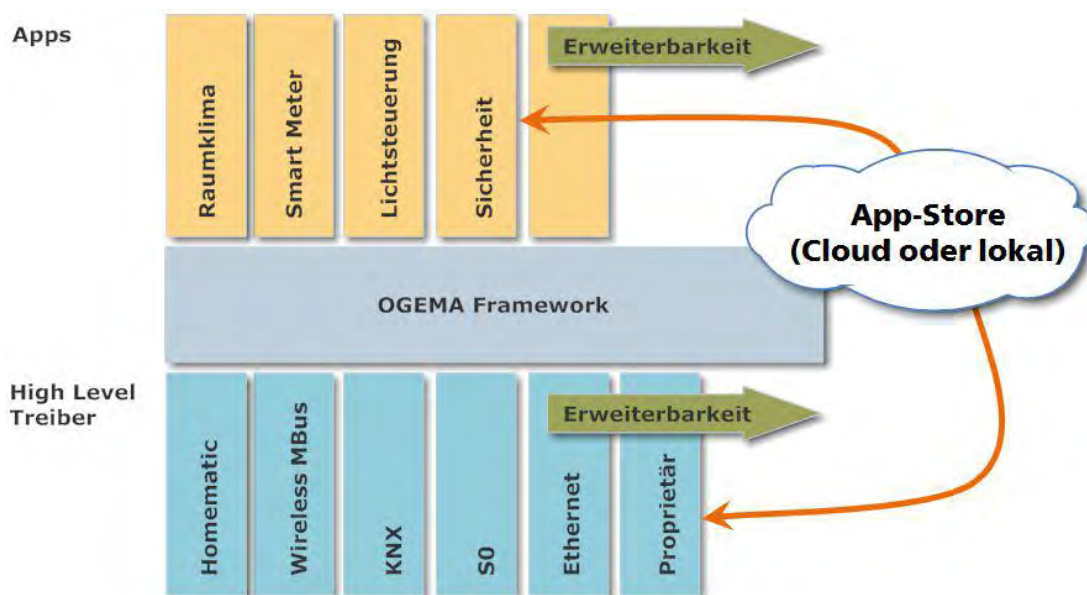


Abbildung 105: OGEMA Protokollstack und Erweiterbarkeit über App-Store

Innerhalb des EnCN wurde schwerpunktmäßig mit dem Bereich Building zusammengearbeitet. So entstand im Rahmen einer Kooperation mit der TH-Nürnberg eine OGEMA App, die dem Nutzer auf Basis verschiedener Messwerte dem Nutzer wichtige Informationen bezüglich des richtigen Heizens und der Vermeidung von Schimmel gibt.

Die erreichten Ergebnisse bezüglich OGEMA sind insbesondere relevant für Energieflusssteuerung und Energiemanagement, ganz allgemein für den Einsatz in der Industrie und dem Gebäude. Das Framework wurde bereits an zwei KMU lizenziert. Besondere Stärken zeigen sich bei der Nutzung und Speicherung von regenerativer Energie wie Photovoltaik. Im Augenblick werden erste Gespräche mit Industriekunden geführt, wie man OGEMA zum Management von virtuellen Kraftwerken einsetzen kann. Weitere interessierte Kunden kommen aus dem Bereich Energiemanagement. Hier geht es darum, wie man mit Hilfe von OGEMA die Vielfalt unterschiedlicher Energiemesssysteme in den Griff bekommt. OGEMA kann in diesem Fall bei der Anbindung von bestehenden Messsystemen, dem Installationsmanagement, aber auch der Visualisierung der Messdaten Vorort helfen.

Während der Projektarbeiten sowie bei vielen Gesprächen auf unterschiedlichen Messen hat sich gezeigt, dass die Vorteile von OGEMA nicht nur für den Bereich Energie, sondern auch für eine Reihe weiterer Anwendungsbereiche interessant sind. So werden die im Rahmen des EnCN erarbeiteten Ergebnisse über den EnCN hinaus für die Bereiche Smart Home und Gebäude, Internet der Dinge, Industrie 4.0 und Ambient Assisted Living weiterentwickelt und damit konkret neue industrielle Anwender angesprochen. In allen diesen Anwendungen wird ebenfalls das Thema Energiesparen und Energieeffizienz adressiert. Alle erreichten Resultate fließen in eine OGEMA Professional Version, die von Industriekunden lizenziert werden kann.

13.2 Solartracker für konzentrierte Photovoltaik

Im ENIAC-Projekt ERG (Energy for a Green Society) befasste sich das Fraunhofer IIS zusammen mit Partnern aus der Forschung und Industrie mit der Entwicklung von Technologien zur effizienten Nutzung der Solarenergie. In diesem Projekt wurde die gesamte Verwertungskette von der Erforschung neuer Solarzellen, neuer Architekturen zur Energieernte und -wandlung mit höchstem Wirkungsgrad, bis hin zur Nutzung und Anbindung zukünftiger intelligenter Netze adressiert. Das Fraunhofer IIS war hierbei im Teilprojekt „Effiziente Energiewandlung in Konzentrator-Photovoltaik-Anwendungen (CPV)“ aktiv. Das Institut verfolgte das Ziel, die Verluste entlang der Energiewandlungskette um bis zu 20 % zu reduzieren.



Abbildung 106: Solartracker auf dem Institutsgebäude des Fraunhofer IIS in Nürnberg

Die Besonderheit von CPV-Modulen sind optische Konzentratoren (z. B. Fresnel-Linsen), die das einfallende Sonnenlicht auf sehr kleine hocheffiziente Solarzellen fokussieren. Diese Mehrfachsolarzellen können größere Spektralanteile des Sonnenlichts in elektrische Energie wandeln und erreichen damit Wirkungsgrade von aktuell bis zu 40 %. Durch die vorgelagerte Optik ist es allerdings erforderlich, dass die Solarmodule zu jeder Zeit exakt zur Sonne hin ausgerichtet werden, da sich bereits geringe Abweichungen negativ auf den Energieertrag auswirken. Um dies zu vermeiden, werden die Solarmodule mit Hilfe von Nachführeinrichtungen entsprechend dem Verlauf der Sonne nachgeführt.

Im Rahmen des EnCN Teilprojekts NET wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts ERG in einer Demonstrations- und Forschungsanlage für CPV-Anwendungen angewandt, die zukünftig als Plattform für weitere Forschungsaktivitäten zur Verfügung

steht. Dieser Demonstrator wurde auf dem eigenen Institutsgebäude des Fraunhofer IIS in Nürnberg aufgebaut. Die Anlage verfügt über 24 CPV-Module mit einer Fläche von ca. 10 m² und einer Nennleistung von 1,8 kW, die mit Hilfe eines 2-achsigen Nachführsystems dem Verlauf der Sonne präzise folgen. Im Gegensatz zu üblichen Nachführtechniken erfolgt die Bestimmung des Sonnenstands über die Leistungsdaten der Solarmodule, wodurch der Einsatz zusätzlicher Sensoren entfällt. Hierzu wurde jedes der CPV-Module mit einer Konvertereinheit, bestehend aus einem DC/DC-Konverter und einem Funkknoten, versehen. Ein Maximum Power Point Tracker (MPPT) optimiert den Ertrag jedes Solarmoduls, sodass Ertragseinbußen, aufgrund von Verschmutzung, Alterung oder Verschattung, minimiert werden. Gleichzeitig findet eine Übertragung der ermittelten Leistungswerte drahtlos an die zentrale Steuerung statt, die basierend auf diesen Daten die Ausrichtung entsprechend der Sonne realisiert.

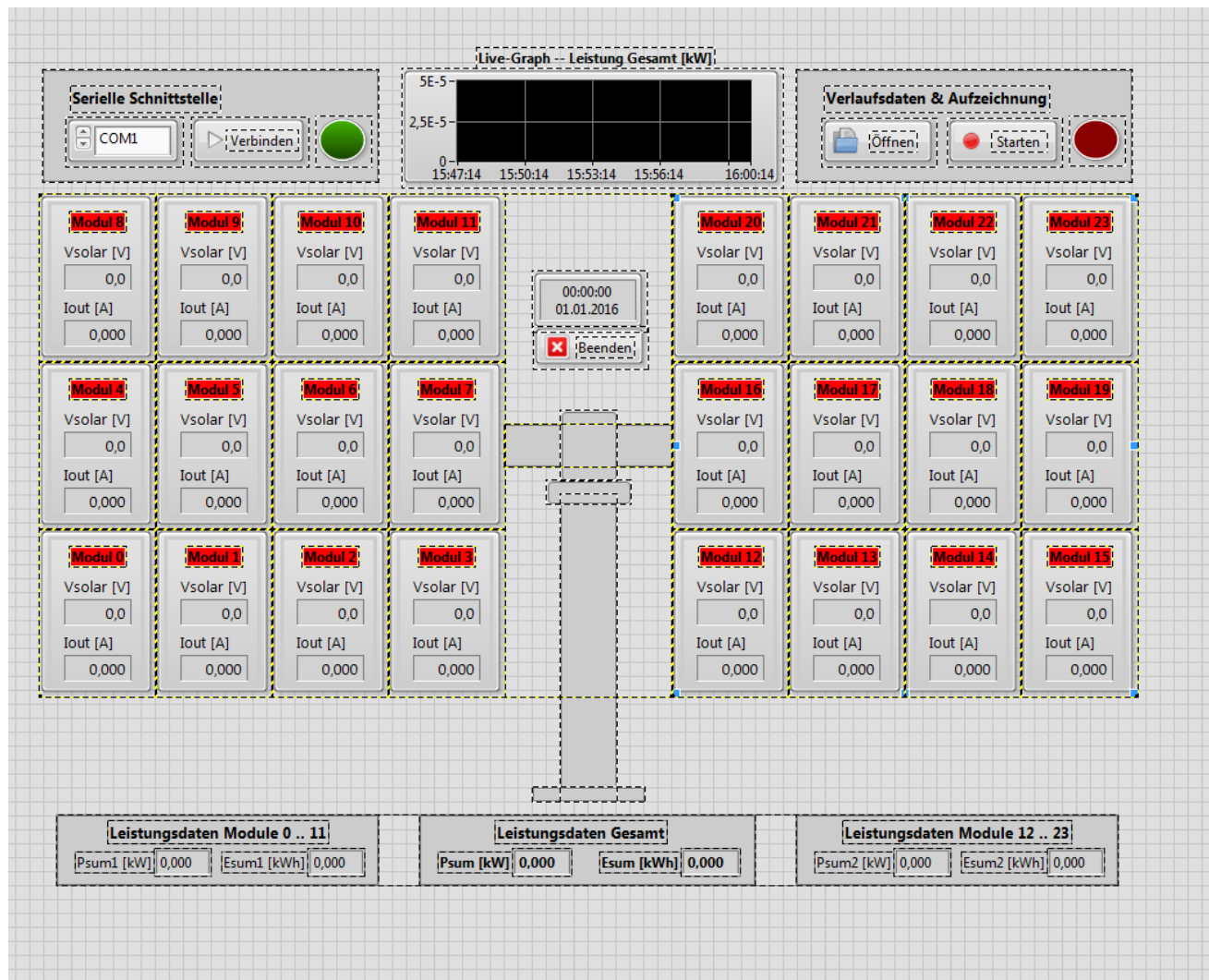


Abbildung 107: Visualisierungssoftware zur Darstellung der Leistungsdaten

Die Solaranlage wurde mit zwei separaten Energiewandlungssträngen konzipiert, in denen jeweils 12 CPV-Module mit ihren zugehörigen Konvertereinheiten über einen Wechselrichter ins Netz einspeisen. Dieser Ansatz erlaubt den direkten Vergleich unterschiedlicher Technologien unter identischen Einstrahlungsbedingungen und ist dadurch für zukünftige Forschungsaktivitäten besonders geeignet.

Die Fernüberwachung der Solaranlage erfolgt mit Hilfe einer IP-Kamera und einer ebenfalls im Rahmen des EnCN entwickelten Steuerungssoftware für den Solartracker. Er kann mit Hilfe dieser Software in einem automatischen oder manuellen Modus gesteuert werden. Im Automatikmodus läuft die Anlage völlig autonom, während der manuelle Modus Eingriffe in das System zur Konfiguration oder zur Fehlerbehebung erlaubt. Die Darstellung der Messdaten erfolgt in einer eigenständig entwickelten Visualisierungssoftware. Die erzeugte solare Leistung jedes einzelnen Moduls und der gesamten Anlage kann so zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden. Die Software ermöglicht Aussagen über die korrekte Funktionalität der Solarmodule und erlaubt eine Archivierung der Leistungsdaten. So kann der solare Leistungsertrag über einen großen Zeitraum erfasst und analysiert werden. Ein Video zum Tagesablauf kann unter www.iis.fraunhofer.de/de/ff/ener/Solartracker.html abgerufen werden.

13.3 Leistungsmonitoring für industrielle Großverbraucher

Aufbauend auf den Prototyp eines Stromsensors mit Halleffektsensoren, der aus einem früheren Projekt am Fraunhofer IIS verfügbar war, wurde ein Leistungsmonitoringsystem speziell für Messungen an elektrischen Großverbrauchern entwickelt. Die Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit Fa. Rauschert, die dieses System mittlerweile produzieren lässt und vertreibt. Die Forschungsarbeiten dienten dazu, den Sensor an eine geeignete Vorverarbeitungseinheit (Gateway) anzuschließen, die Zuverlässigkeit für einen Einsatz als Produkt zu verbessern sowie neue Anwendungsbereiche und Dienstleistungen für das Messsystem zu erschließen.

In Zusammenarbeit mit dem VDE entstand ein Sicherheitskonzept, das nach verschiedenen Optimierungsarbeiten schließlich zu einer VDE-Abnahme des Messsystems führte. Das System besteht aus bis zu 30 Messklemmen, speziellen Messkabeln und einem Gateway zur Speicherung und Weitergabe der Messdaten über Ethernet auf Basis von IP-Protokollen. Aufgrund der Vorgaben des VDE mussten verschiedene Änderungen am Systemkonzept und dem Messklemmendesign durchgeführt werden. Auf dieser Basis erfolgte die Entwicklung des Gateways, das ebenfalls den Sicherheitsvorschriften des VDE genügt. Die Systemfunktionalität wurde schrittweise erweitert, zuletzt um ein Interface mit dem MODBUS TCP Protokoll. Damit kann das System problemlos mit Energiemanagementsystemen verschiedener Anbieter wie z.B. Siemens oder Janitza verbunden werden. Weiterhin wurden die Erfahrungen bei der Installation von in großen Produktionsbetrieben verteilten Messsystemen ausgewertet und Verfahren realisiert, um gerade den Installations- und Montageprozess weiter zu optimieren. Für die Serienproduktion des Messsystems erfolgte die Konzipierung eines Test- und Kalibrierplatzes, mit dem nun der Abnahmetest der gefertigten Messklemmen durchgeführt wird.

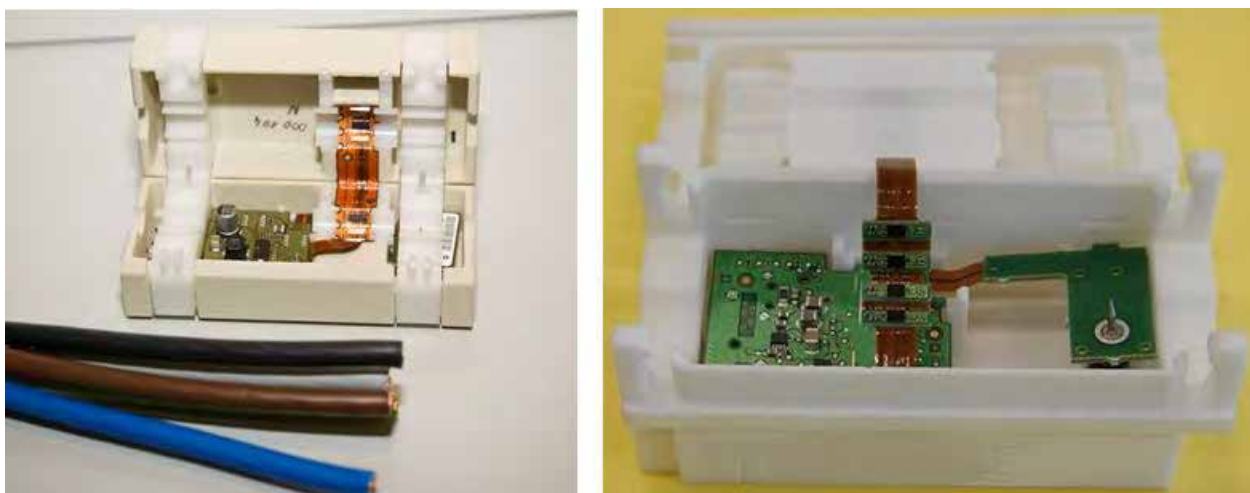


Abbildung 108: Vorher-Nachher Vergleich: Prototyp der LEISTMON-Messklemme (Keramik) - vom VDE zugelassene Messklemme (Kunststoff)

In weiteren Aufträgen erfolgte die Integration neuer Diagnoseverfahren zur Optimierung des Installationsprozesses. Beim Einbau der Messklemmen in elektrischen Verteilerschränken kann nun eine zuverlässige Kontaktierung des Spannungsabgriffs getestet und damit sichergestellt werden. Verschiedene durchgeführte Optimierungsschritte bei der Messwertbestimmung führten zu einer deutlichen Verbesserung der Messgenauigkeit, für den amerikanischen Markt wurde eine 60 Hz-Variante des Messsystems entwickelt. Verschiedene Kundengruppen äußerten den Wunsch nach einer Highspeed-Variante mit einer zeitlichen Messauflösung von 20 Millisekunden. Für diese Anforderung wurde ein geeignetes Systemkonzept entwickelt.

Dieses System kann auch zum Condition Monitoring von elektrischen Großverbrauchern wie z.B. elektrischen Motoren eingesetzt werden. Auf diesen Informationen basierende vorbeugende Wartungsarbeiten reduzieren die Gefahr von Betriebsunterbrechungen oder Arbeiten in einem falschen Betriebspunkt mit damit verbundenem unnötigem Energieverbrauch. Weiterhin ermöglicht ein transparentes Überwachen des aktuellen Energieverbrauchs und entsprechende korrigierende Eingriffe eine Steigerung der Energieeffizienz von Geräten und Anlagen im Gebäude- und Industrieumfeld.

Bei einer Studie zum Einsatz des Messsystems im Bereich von Smart Grid haben verschiedene Verteilnetzbetreiber Interesse an Messungen im Mittelspannungsbereich gezeigt. Daraufhin entstand das Konzept für eine neuartige Mittelspannungsklemme. Weiterhin wurde das Thema »Non Intrusive Load Monitoring« untersucht. Hier ging es darum, dass man mit geeigneten Algorithmen den Stromverbrauch an einer einzelnen Messstelle analysiert, um daraus die Verbräuche aller an diesem Punkt angeschlossenen Geräte zu bestimmen. Dieses Verfahren spart den Einsatz von zusätzlichen Messsystemen und damit Kosten und

Ressourcen, erfordert aber umfangreiche Kenntnisse über Verbrauchskennlinien einzelner Geräte und hat sich noch nicht weiter durchgesetzt.

Die erreichten Ergebnisse in diesem Teilprojekt sind insbesondere relevant für ein optimiertes Energiemanagement und die Steigerung der Energieeffizienz. Durch die Verbesserung der Messverfahren ist es nun möglich, auf Basis der Messwerte Energieflüsse deutlich besser zu steuern. Dies gilt insbesondere für die Einbindung von regenerativer Energie in industrielle Produktionsprozesse.

Die enge strategische Zusammenarbeit mit der Firma Rauschert soll über die Phase 1 des Energie Campus weitergeführt werden. Es erfolgten bereits Gespräche mit weiteren Industrieunternehmen zur Entwicklung weiterer neuer Messverfahren. Entsprechende Angebote wurden abgegeben. Als ein wichtiges Zukunftsthema ist die Einbindung der Energieerfassung als Datenlieferant für neue Algorithmen zum Thema Predictive Analytics zu nennen. Mit diesem Forschungsgebiet aus dem Bereich Big Data sollen weitere Optimierungsmöglichkeiten untersucht werden, um Energienetze zu stabilisieren und industrielle Anlagen und Prozesse effizienter zu gestalten.

14 Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik

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

Im Fokus des neuen Lehrstuhls steht das Thema Leistungselektronik für die elektrische Energieversorgung in stationären wie auch mobilen Anwendungen. Dieses Gebiet umfasst neben stationären dezentralen elektrischen Energienetzen u.a. auch die Bordnetze von Kraftfahrzeugen, Schiffen, Bahnen und Flugzeugen. Forschungsthemen sind insbesondere:

- Schaltungs- und Systemtechnik leistungselektronischer Wandler für den höheren Spannungs- und Leistungsbereich (380 V ... 20 kV, 5 kW... 10 MW) unter besonderer Berücksichtigung neuer Halbleiterbauelemente (SiC, GaN, ...) und innovativer Integrationstechnologien
- Lebensdauer und Verfügbarkeit von leistungselektronischen Netzbetriebsmitteln, fehlertolerante Systeme
- Stabilitätsuntersuchungen in von leistungselektronischen Wandlern dominierten Versorgungsnetzen, insbesondere Gleichspannungsnetzen
- Halbleiterbasierte Schutz- und Systemtechnik für DC-Netze im Nieder- und Mittelspannungsbereich

Der Lehrstuhl verfügt am Energie Campus Nürnberg zum Stand 31.12.2016 über zwei Laborhallen mit zusammen etwa 200 qm sowie über vorläufig drei Büroräume mit insgesamt 120 qm. Die Architektenplanungen für die künftigen Büro- und Laborflächen des Lehrstuhls im Bau 33 „auf AEG“ sind abgeschlossen. Die Mietverhandlungs- und Genehmigungsverfahren laufen noch und liegen zum Jahresende etwas hinter dem Zeitplan. Eine Bezugsfertigkeit der Räume bis Mitte 2017 wird angestrebt.

Durch die sehr enge Kooperation mit dem Fraunhofer IISB am Energie Campus Nürnberg konnte trotz der Neugründung und der provisorischen Räumlichkeiten vom Start weg eine operative und fachlich-/labortechnische Arbeitsfähigkeit des Lehrstuhls hergestellt werden. Über die Internetseite www.lee.tf.fau.de ist das Angebot des Lehrstuhls öffentlich.

Zum Jahresende 2016 umfasste der Lehrstuhl drei wissenschaftliche Assistenten, eine Sekretärin und mehrere studentische Hilfskräfte. Betreut wurden 26 studentische Arbeiten aus dem Bereich der Energietechnik und Leistungselektronik, dazu gut zwanzig Doktoranden.

Gemeinsam mit dem bayerischen Cluster Leistungselektronik, dem Energie Campus Nürnberg und dem Fraunhofer IISB veranstaltet der LEE das monatliche Leistungselektronik-Kolloquium in der Metropolregion Nürnberg.

Das beantragte EU-Projekt "Connect" wurde positiv begutachtet und wird voraussichtlich 2017 starten. Der Antrag für das EU-Projekt „DC-FORWARD“ ist eingereicht – ebenso ein Antrag beim Freistaat Bayern zum Thema „Mittelspannungskomponenten der nächsten Generation“.

Ein besonderes Ereignis, das bereits jetzt die Aufmerksamkeit der Fachwelt auf Nürnberg richtet und auch die Sichtbarkeit des EnCN stärken wird, ist die vom LEE und dem Fraunhofer IISB in Kooperation mit dem IEEE in Nürnberg veranstaltete „2nd International Conference on DC Microgrids“ vom 27. bis 29. Juni 2017.

15 Schlussworte

Das elektrische Energienetz wird in Zukunft anders aussehen als bisher. Rückblickend bleibt festzustellen, dass vieles, was sich zu Beginn des EnCN als dringender kurzfristiger Entscheidungs- und Lösungsbedarf abzeichnete, noch immer offen ist. Nach wie vor

gibt es Befürworter mehr dezentraler, kleinzelliger Erzeugung und Verfechter einer eher auf einen europäisch Markt ausgerichteten Erzeugung, was erhebliche Auswirkungen auf die Netzstruktur und die nötige Informations- und Kommunikationsinfrastruktur hat. Auch wenn es in den letzten Jahren keinen wirklichen Blackout in Deutschland gegeben hat, stiegen die Anzahl der Eingriffe (Redispatch) und der damit verbundenen Kosten gerade in den letzten Jahren erheblich. Dies zeigt, dass noch stille Reserven vorhanden waren, die aber absehbar aufgebraucht sein werden. Mit den Arbeiten im Projekt NET wurden wichtige Beiträge für das Smart Grid geliefert, unabhängig davon, wie sich die Balance zwischen zentraler und dezentraler Erzeugung letztendlich einpendeln wird. Manche davon sind schon heute in der Anwendung und Nutzung, andere bilden die Basis für zukünftige Produkte und Netzbetriebsverfahren.

Die Kontinuität der Arbeiten des Projekt NET in Phase 2 im EnCN am Standort „AufAEG“ wird durch den neuen „Lehrstuhl für Elektrische Energietechnik“ sowie den „Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme“ sichergestellt. Auch werden die beiden Fraunhofer Institute IIS und IISB weiterhin dort vertreten sein.

16 Veröffentlichungen

- [1] Waltrich, Uwe; Malipaard, Dirk; Schletz, Andreas, "Novel Design Concept for Modular Multilevel Converter Power Modules," PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of , vol., no., pp.1,6, 20-22 May 2014
- [2] Waltrich U., Yu Z., Schletz A., Reichenberger M.: Bonding Copper Terminals onto DBC Substrates of Power Modules by Resistance Projection Welding; IEEE Electronic Drives Production Conference, 2015
- [3] Waltrich, U.; Müller, N.; Bayer, C. F.; Schletz, A.; März, M.: Power Modules – Trench Coating for Lifetime Enhancement of Ceramic Substrates, PLUS – Fachzeitschrift für Leiterplatten und Elektronik, 11/2015
- [4] U. Waltrich; B. Ruccius; D. Malipaard; A. Schletz; M. März: Dimensioning of a Novel Design Concept for MMC Submodules, CIPS, 2016
- [5] T. Bopp, R. Krebs, F. Lazar, M. Dauer, J. Jaeger. Improving Grid Reliability by Application of Protection Security Assessment. RSEEC CIGRE-Tutorial, Timisoara, 05.2014
- [6] T. Bopp, R. Krebs, R. Ganjavi, B. Ntsin, M. Dauer, J. Jäger. Automated System-wide Protection System Performance Review and Setting Improvement. PAC World 2014. Zagreb, 06.2014
- [7] J. Vogelsang, J. Jäger. An adaptive quadrilateral characteristic for first zone protection. PAC World 2015, Glasgow, UK 07.2015
- [8] J. Schindler, Ch. Romeis, J. Jäger. Calculation of electrical field below Hybrid Overhead Lines. IEEE PESS Power Energy Student Summit, Dortmund, 01.2015. Best-Presentation –Award
- [9] C. Blug, L. Shang-Jäger, T. Bopp, R. Krebs, M. Dauer, J. Jäger. Lessons Learnt from Systematic Protection Security Assessment in Distribution Networks. PAC World 2016, Ljubljana, Slovenia, 06.2016
- [10] M. Dauer, J. Meyer, J. Jäger, T. Bopp, R. Krebs. Heuristic for a Computer-Based Protection Relay Coordination. PAC World 2016, Ljubljana, Slovenia, 06.2016
- [11] M. Dauer, J. Meyer, J. Jäger, T. Bopp, R. Krebs. A PSO Algorithm for System-Wide Protection Coordination., PSSC Power System Computation Conference, Genua, Italy, 06.2016
- [12] J. Schindler, J. Jäger. Advanced Load Blinding of Distance Protection Relays based on Physical Grid Limitation. IEEE PES General Meeting 16PESGM0948, awarded as a Best Conference Paper, Boston, USA, 07.2016
- [13] J. Vogelsang, C. Romeis, J. Jäger. Real Time Adaption of Dead Time for Single Phase Auto-reclosing. IEEE Transactions on Power Delivery, Special Section on Frontiers of Power System Protection, Vol. 31, No. 4, TPWRD-00830-2015, pp. 1882-1890, 08.2016
- [14] M. Schroeder, J. Jaeger. The Idea of a Modular Multilevel Converter with Integrated Batteries. International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP), 2012
- [15] M. Schroeder, S. Henninger, J. Jaeger. Integration of Batteries into a Modular Multilevel Converter. 15th Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013
- [16] M. Schroeder, S. Henninger, J. Jaeger. An Enhanced Modulator Concept for the Modular Multilevel Converter. 16th Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2014
- [17] S. Henninger, H. Rubenbauer, J. Jaeger. An advantageous grid integration method and control strategy for renewable energy sources and energy storage systems. International ETG-Congress, 2015
- [18] M. Schroeder, S. Schmitt, S. Henninger, H. Rubenbauer, J. Jaeger. Measurement Results of a Modular Energy Storage System unevenly equipped with Lithium-Ion Batteries. 17th Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2015
- [19] S. Henninger, M. Schroeder, J. Jaeger. Combining frequency containment reserves and renewable power leveling in energy storage systems. 10th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), 2016

- [20] S. Henninger, J. Jaeger, H. Rubenbauer. Dimensioning and Control of Energy Storage Systems for Renewable Power Leveling. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016
- [21] E. Fischer, Ch. Weindl. Perspective on Spatially-Resolved Diagnostic Methods for Power Cables, 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2014), 8-11 June 2014, Philadelphia, PA, USA, 2014
- [22] E. Fischer, Ch. Weindl. Ortsauflösende Diagnoseverfahren für Energieversorgungs-kabel und deren Perspektive, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE-ETG Konferenz, Berlin, 2014
- [23] E. Fischer, Ch. Weindl. Spatially-resolved measurement and diagnostic method for power cables using interference characteristics of travelling waves, 9th International Conference on Insulated Power Cable (JICABLE 2015), 21-25 June 2015, Paris-Versailles, Frankreich, 2015
- [24] E. Fischer, Ch. Weindl. Spatially-resolved measurement and diagnostic method for power cables using interference characteristics of travelling waves, CIGRE Science & Engineering Journal, Invited Journal Paper, CIGRE, 2015
- [25] E. Fischer, Ch. Weindl. Experimental Results of a Diagnostic Measurement Method for Power Cables Using Interference Characteristics of Travelling Waves, 2016 Electrical Insulation Conference (EIC 2016), 19-22 June 2016, Montreal, USA, 2016
- [26] E. Fischer, Ch. Weindl. Laboratory measurement results of a spatially-resolved diagnostic method for power cables using travelling waves, Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2016, 6.-8. September 2016, Pilsen, Tschechische Republik, 2016
- [27] E. Fischer, Ch. Weindl. Ausnutzung der Interferenzeigenschaften von Wanderwellen zur ortsauflösenden Diagnose von Mittelspannungskabeln, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2016, 15.-16.11.2016, Berlin, Deutschland, 2016
- [28] T. Scharrer; F. Eppelein; C. Weindl. Development of a Measurement System for Off-line Diagnosis of MV Cables. 2016 Electrical Insulation Conference (EIC 2016), 19-22 June 2016, Montreal, USA
- [29] T. Scharrer; F. Eppelein; C. Weindl. Diagnostic System for Off-Line Diagnosis of MV Cables. Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2016, 6.-8. September 2016, Pilsen, Tschechien
- [30] F. Eppelein; T. Scharrer; C. Weindl. Entwicklung eines Messsystems zur Offline-Diagnose von Mittelspannungskabeln. VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2016, 15.-16.11.2016, Berlin, Deutschland
- [31] Joffe, C., Ditze, S., Roßkopf, A.: A novel positioning tolerant inductive power transfer system, Energy Transfer for Electric Vehicles Conference (ETEV), Nuremberg 2013
- [32] Stefan Ditze, Steady-state analysis of the bidirectional CLLLC resonant converter in time domain, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, 2014
- [33] Roßkopf, A.; Joffe, C.; Bär, E.: Calculation of ohmic losses in litz wires by coupling analytical and numerical methods, Conference ETEV, Nuremberg 2014
- [34] Stefan Ditze, Steady-state analysis of the bidirectional CLLLC resonant converter in time domain, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, 2014
- [35] Roßkopf, A.; Joffe, C.; Bär, E.: Influence of Inner Skin- and Proximity Effects on Conduction in Litz Wires, IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 29, Issue: 10, Oct. 2014), S. 5454 - 5461
- [36] Roßkopf, A.; Joffe, C.; Bär, E.; Bonse, C.: Calculation of Power Losses in Litz Wire Systems by Coupling FEM and PEEC Method, IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 31, Issue: 9, Sept. 2016), S. 6442 - 6449
- [37] Stefan Ditze, Steady-state analysis of the bidirectional CLLLC resonant converter in time domain, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, 2014
- [38] Joffe, C.; Roßkopf, A.; Ehrlich, S.; Dobmeier C.; März, M.: Design and optimization of a multi-coil system for inductive charging with small air gap, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach 2016
- [39] Ditze, S.; Heckel, T.; März, M.: Influence of the junction capacitance of the secondary rectifier diodes on output characteristics in multi-resonant converters, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach 2016
- [40] Roßkopf, A.; Endruschat, A.: Influence of Varying Bundle Structures on Power Electronic Systems Simulated by a Coupled Approach of FEM and PEEC, IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016
- [41] B. Sanftl, C. Joffe, M. Trautmann, R. Weigel, and A. Koelpin, "Reliable data link for power transfer control in an inductive charging system for electric vehicles," in IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, Mai 2016
- [42] M. Trautmann, B. Sanftl, F. Pflaum, R. Weigel, and A. Koelpin, "Coupling Filter Design for Data Transmission in an Inductive Power Transfer Systems" in Integration of Sustainable Energy Conference, Jul. 2016.
- [43] B. Sanftl, F. Pflaum, M. Trautmann, R. Weigel, and A. Koelpin, "Digital Transceiver Design for Data Communication in Inductive Power Transfer Systems" in Integration of Sustainable Energy Conference, Jul. 2016.
- [44] M. Trautmann, B. Sanftl, R. Weigel, and A. Koelpin, "Frequency Separation Stage Design for a Reliable Data Link in an IPT System for Electric Vehicles" in IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Dec. 2016
- [45] M. Giegerich, S. Koffel, R. Filimon, J. L. Grosch, T. Fuhner, M. M. Wenger, M. Gepp, V. R. H. Lorentz, Electrothermal Modeling and Characterization of High Capacity Lithium-Ion Battery Systems for Mobile and Stationary Applications, Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Vienna, Austria, 2013

- [46] M Giegerich, M. Akdere, C. Freund, T. Fühner, J. Grosch, S. Koffel, R. Schwarz, S. Waldhör, M. Wenger, V.R.H. Lorentz, M. März, Open, Flexible and Extensible Battery Management System for Lithium-Ion Batteries in Mobile and Stationary Applications, 2016 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, CA, USA, 2016
- [47] K. Veerashekar; S. Weiß; M. Luther. Frequency Regulation in Transmission Grids Using Virtually Interconnected Battery Storage Systems. CIGRE Symposium, Dublin, 2017
- [48] 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
- [49] 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
- [50] R. German; K. Goetz; V. Grimm; A. Kufner; C. Leepa; M. Luther; S. Mehl; I. Sigert; D. Steber; K. Veerashekar. SWARM – Successful Provision of Frequency Containment Reserve with Distributed Energy Storage. International Renewable Energy Storage Conference, Düsseldorf, 2016
- [51] K. Veerashekar; P. La Seta; M. Luther. Impact of Distributed Battery Energy Storage Systems on Low Voltage Grids with High Amount of Photovoltaics. International ETG Congress, Bonn, 2015
- [52] M. Klatt; A. Oeder; K. Ronge. Eine Einschätzung bestehender Smart Grid Übertragungsverfahren im Hinblick auf den Energieverbrauch. VDE-Kongress Smart Grid – Intelligente Energieversorgung der Zukunft, 2012
- [53] M. Kuba; M. Klatt; A. Oeder. Low-complexity sequence detection algorithm for FSK-based power line communications. 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2014.
- [54] M. Kuba. Wake-up transceiver protocol for power line communications. 19th IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2015.
- [55] S. Mueller, F. Lurz, R. Weigel, A. Koelpin, „A High Performance Line Filter for Narrowband Power Line Communication Testbed Applications“, IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), S.690-695, 2013.
- [56] S. Mueller, J. Dennerlein, I. Janke, J. Weber, R. Weigel, and A. Koelpin, "In-Containment Signal Conditioning and Transmission via Power Lines within High Dose Rate Areas of Nuclear Power Plants" in International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2015.

17 Patente

- [1] J. Vogelsang, J. Jäger, M. Kereit. Ein Verfahren zur Anpassung des Lastausschnittes an bestehende Netzverhältnisse. Anmeldenummer DE102015202493.8. 2015
- [2] J. Jäger, C. Romeis, M. Ramold, J. Vogelsang, J. Verfahren zur Kurzunterbrechung und Schutzgerät, Abmeldenummer DE201410201595. 2014
- [3] S. Henninger, J. Jaeger, H. Rubenbauer, U. Krebs, M. Schroeder, K. Rechenberg. Kraftwerksanlage. Anmeldenummer PCT/EP2014/070545
- [4] E. Fischer, Ch. Weindl, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Verfahren sowie Vorrichtung zur orts aufgelösten Diagnose.
- [5] V.R.H. Lorentz, M. März, M. Wenger, Energiespeicherzelle, Energiespeicherzellenmodul und Trägersubstrat
- [6] J. vom Dorp, T. Erlbacher, L. Frey Elektrisches Überbrückungselement, insbesondere für Speicherzellen eines Energiespeichers
- [7] T. Erlbacher; V.R.H Lorentz; R. Waller; G. Rattmann. Vorrichtung und Verfahren zur Überbrückung eines elektrischen Energiespeichers.
- [8] R. Waller, V.R.H. Lorentz, M. März, Elektrische Überbrückungseinrichtung zum Überbrücken einer elektrischen Energiequelle oder eines Energieverbrauchers
- [9] V.R.H. Lorentz, M. Wenger, M. März, Anordnung mit multifunktionalem Anschluss für Energiespeicherzellen oder Energieverbraucher
- [10] R. Waller, V.R.H. Lorentz, M. März, Elektrische Energiespeicherzelle mit integrierter Überbrückungseinrichtung
- [11] R. Waller, V.R.H. Lorentz, M. März, Elektrische Überbrückungseinrichtung zum Überbrücken elektrischer Bauelemente, insbesondere einer Energiequelle oder eines Energieverbrauchers
- [12] M. Kuba; M. Klatt. Device and Method Of Sequence Detection for Frequency-Shift Keying. United States Patent, Patent No.: US 9,450,793 B2. 2016.

PROCESS

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm Institut ELSYS	TP1: Effizienzverbesserung bei elektrischen Maschinen (Prof. Dr. Andreas Kremser) TP2: Effizienzverbesserung im elektrischen Antriebsstrang (Prof. Dr. Armin Dietz)

Projektbericht EnCN1

Mit der Umsetzung der klimapolitischen Ziele stehen die Energiewende und die Steigerung der Energieeffizienz im Vordergrund aller Bemühungen. Besonders im Industriesektor, welcher 44 % des gesamten Energieumsatzes in Deutschland ausmacht, ist eine Effizienzsteigerung zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende von grundlegender Bedeutung. Im Industriebereich bildet die elektrische Energie mit ca. 230 TWh Jahresarbeit gemäß einer Erhebung des Zentralverbandes der Elektroindustrie (ZVEI) die bedeutendste Energieform. Hierbei entfallen alleine zwei Drittel dieses Energieaufkommens auf die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie durch Elektromotoren. Eine Verbesserung der Energieeffizienz der elektrischen Maschinen ist demnach die wirkungsvollste Maßnahme zur Steigerung der Effizienz der industriellen Energienutzung.

Im Forschungsfeld PROCESS wird die Energieeffizienzsteigerung für Elektromotoren und elektromotorische Systeme untersucht. Zum einem wird an der Verbesserung von Elektromotoren durch genaueres Verständnis der Verlustmechanismen gearbeitet und zum anderen an der Verlustmodellierung und Optimierung des Energieeinsatzes bei elektrischen Antriebssträngen. In weiteren Forschungsarbeiten werden die Erkenntnisse in Algorithmen umgesetzt, durch neuartige Regelungskonzepte und verlustarme Betriebsweise der Motoren und Antriebe die Energieeffizienz weiter steigern und darüber hinaus einen Beitrag zur Antriebstechnik für Industrie 4.0 liefern.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Armin Dietz
 Technische Hochschule Nürnberg
 Georg Simon Ohm



E-Mail
Armin.Dietz@encn.de

Telefon
 +49 911 / 5880 1056

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/jckll8g>

1 Energetische Optimierung von mechatronischen Antriebssträngen

Im Forschungsfeld „energetische Optimierung von mechatronischen Antriebssträngen“ konnten über die Projektlaufzeit Simulationsmodelle entwickelt werden, die es erlauben, den Energieumsatz und damit die Energieeffizienz von komplexen Systemen über lange Fahrzyklen hinweg zu betrachten und vorzuberechnen. Dazu wurden zu Beginn verschiedene Simulationswerkzeuge von unterschiedlichen Anbietern miteinander verglichen und auf ihre Potentiale zur Verwendung im Projekt hin untersucht.

Im Rahmen der Fragestellung des Projekts wurden vollständige Verlustmodelle von Anlagen erstellt, die durch den Einsatz von elektrischen Antrieben geprägt sind. Hierbei lag der Fokus, bedingt durch die Projektpartner, auf fördertechnischen Anlagen (Förderbandanlagen, Regalbediengeräten, Pumpenanlagen). Bei der Firma Klinkhammer (Nürnberg) bestand die Möglichkeit, Messungen an realen Anlagen durchzuführen und somit die Modelle zu verifizieren. Zudem wurden Datensätze und Messungen von bestehenden Anlagen von den Projektpartnern der Arbeitsgruppe zur Verfügung gestellt. Die Modelle enthalten alle energetisch relevanten Komponenten der Anlagen: von elektrischen Maschinen, über Umrichter bis hin zu Fahr- und Hubwerken. Abbildung 109 zeigt beispielhaft das untersuchte automatisierte Regalbediengerät (RBG) der Firma Klinkhammer (links) und dessen vereinfachte Darstellung des Modells (mitte), sowie das Kräftemodell eines untersuchten Förderbandes (rechts)



a

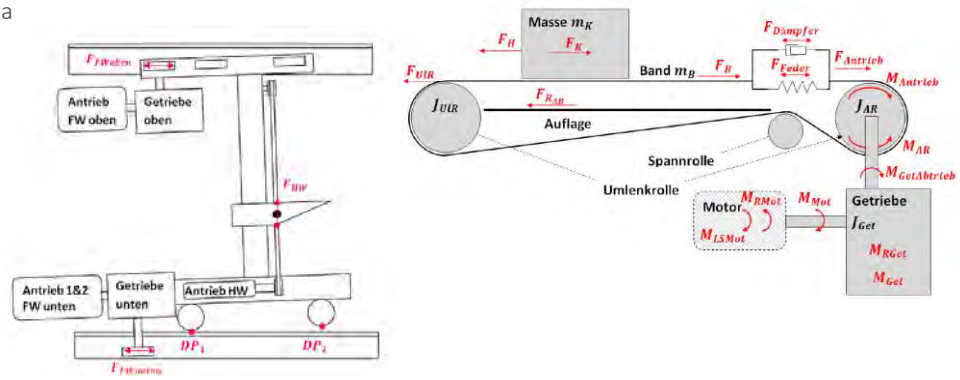


Abbildung 109: Automatisiertes Regalbediengerät (RBG) der Firma Klinkhammer (links) und vereinfachte Darstellung des Kräftemodells des RBG (mitte), sowie eines untersuchten Förderbandes (rechts)

Der Tatsache, dass sich die Effizienz der Antriebskomponenten abhängig vom Betriebspunkt ändert, wurde dadurch Rechnung getragen, dass die Antriebskomponenten über Verlustkennfelder abgebildet wurden. Dies hat den Vorteil, dass die in den elektrischen Komponenten vorkommenden und verlustverursachenden sehr schnellen Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter, die im Bereich von 100 ns liegen, nicht über die gesamte Simulationsdauer explizit berechnet werden müssen. Durch diese Maßnahme wurde die Simulationsdauer um einen Faktor 1000 reduziert und es konnte damit eine genaue energetische Analyse auch von komplexen Antriebssystemen über längere Betriebszyklen ermöglicht werden. Dieses Vorgehen und die Ergebnisse dienen dann als Grundlage für die energetische Optimierung.

Die verwendeten Verlustkennfelder werden aus Datenblatt- und Herstellerangaben berechnet. Hierfür mussten Verlustmodelle für elektrische Maschinen und für Frequenzumrichter untersucht und entwickelt werden. Für die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens ist es notwendig, die Verlustkennfelder aus möglichst wenigen Eingangs- und Datenblattwerten zu erzeugen. Durch die Möglichkeit der Berechnung der Verlustkennfelder können diese sehr engmaschig erzeugt werden, was wiederum im Anschluss bei der Berechnung der Gesamtverluste die Genauigkeit deutlich erhöht. Die messtechnischen Überprüfungen zeigen gute Übereinstimmung der berechneten Modellgrößen nicht nur bei Nennbetrieb, sondern auch für den energetisch wichtigen Teillastbereich. Die Abbildung 110 zeigt zwei berechnete Verlustkennfelder eines Frequenzumrichters, links mit 100 Berechnungspunkten und rechts mit 900 Berechnungspunkten.

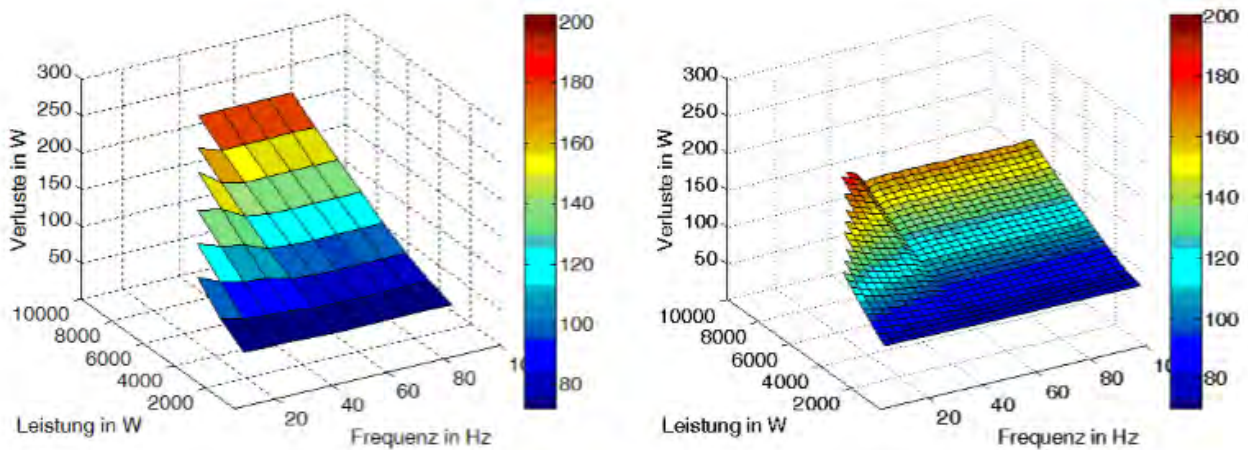


Abbildung 110: Berechnete Verlustkennfelder eines Frequenzumrichters mit 100 Berechnungspunkten (links) mit 900 Berechnungspunkten (rechts)

Würden die Verlustkennfelder der Komponenten messtechnisch ermittelt werden, wären derart engmaschige Kennfelder aus Aufwands und Zeitgründen nur für eine geringe Anzahl von Komponenten möglich. Durch die im Vorhaben entwickelte Methodik kann eine Vielzahl von Komponenten unterschiedlicher Hersteller in das Berechnungsprogramm aufgenommen werden und für energetische Optimierungen genutzt werden.

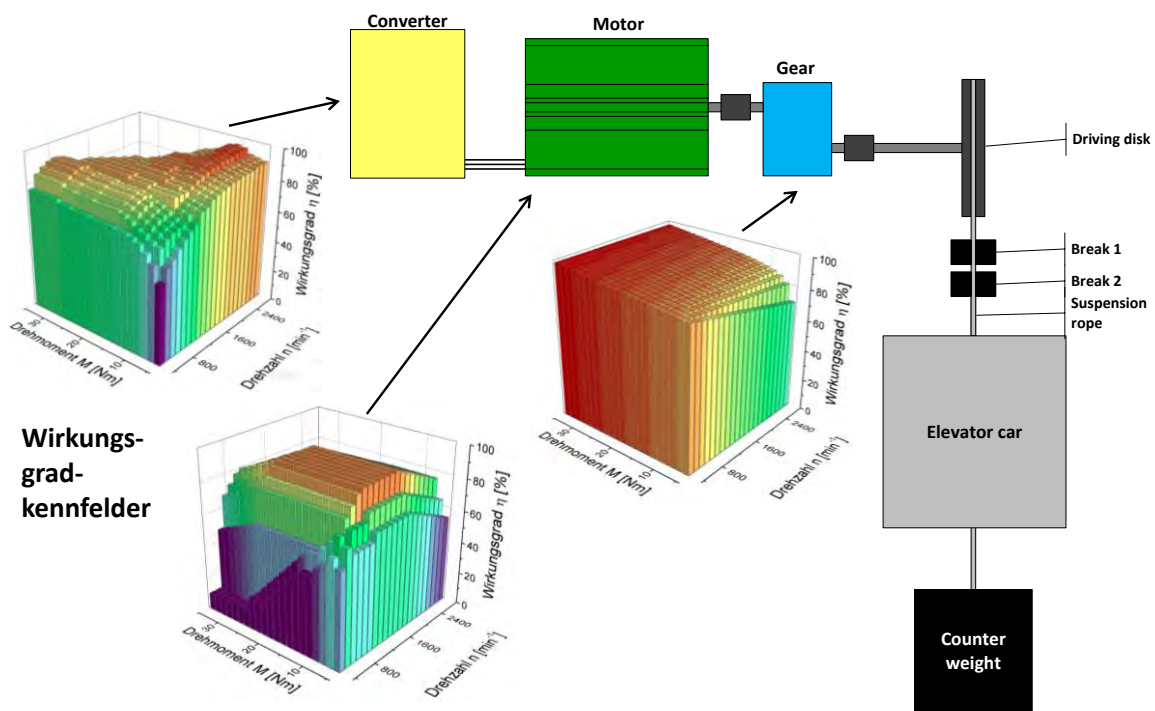


Abbildung 111: Energetische Simulation eines Aufzugs – Beschreibung der Antriebskomponenten durch Wirkungsgradkennfelder

Mit Hilfe der entwickelten Modelle ist eine energetische Optimierung von mechatronischen Antriebssträngen durchführbar. Hierzu kann sowohl bei der Auslegung der Komponenten die effizienteste Kombination aus den verschiedenen Antriebskomponenten durch Variation berechnet werden. Zudem können Fahrprofiloptimierungen durchgeführt werden. Hierfür können zum Beispiel die Auswirkungen verschiedener Beschleunigungs- und Bremsrampen miteinander energetisch verglichen werden. Neben dem energetischen Gesichtspunkt könnten auch wirtschaftliche Aspekte in das Modell einfließen, wenn Investitions- und Energiekosten bewertet werden sollen.

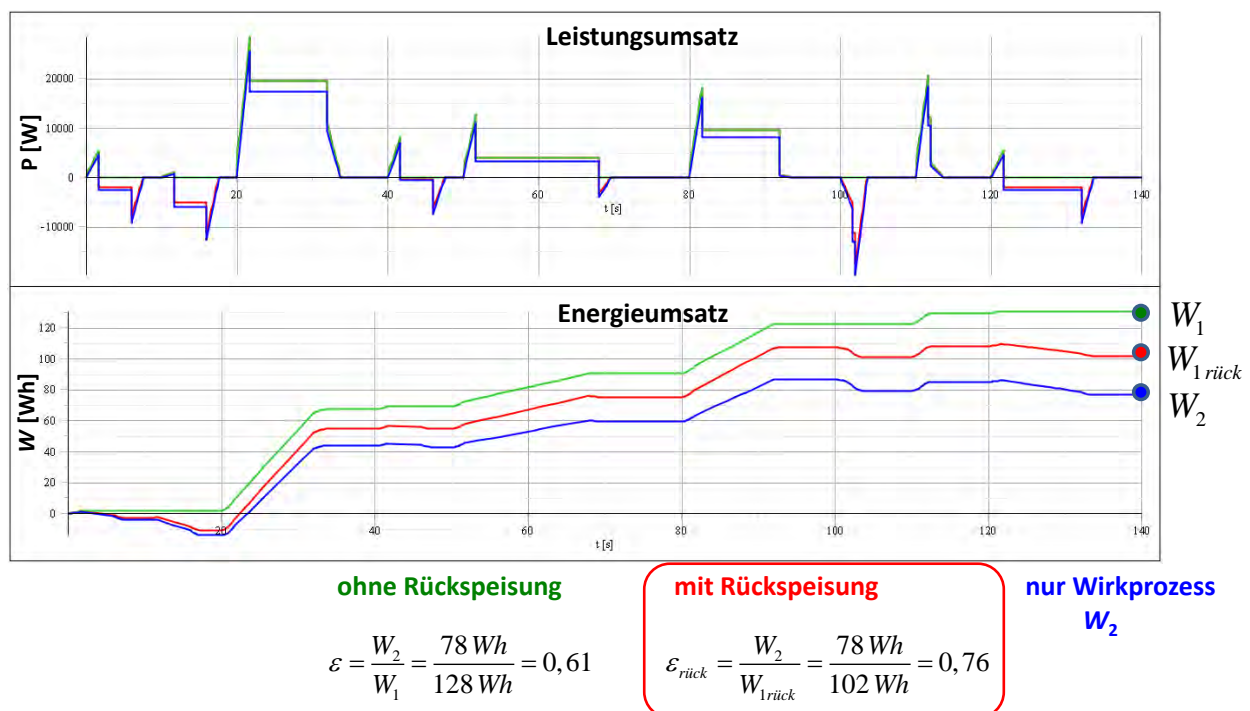


Abbildung 112: Simulationsbeispiel Aufzug – durch rückspeisefähige Umrichter können in diesem Fahrbeispiel 26 Wh, d.h. 20 % Energie eingespart werden

Als mögliche Anwendung ist nachfolgend ein Aufzug dargestellt. Hier kann der Energieverbrauch des Gesamtsystems mit und ohne Rückspeisung der Bremsenergie ins Netz berechnet werden. Die Abbildung 111 zeigt das energetische Modell eines Aufzuges mit den zugehörigen Wirkungsgradkennfeldern, das der Simulation zu Grunde liegt. Der Energieumsatz für ein bestimmtes Fahrprofil ist in Abbildung 112 gezeigt. Wie man den Simulationsergebnissen entnehmen kann, steigt die Energieeffizienz von 61 % auf 76 %, wenn der Aufzugsantrieb mit einem rückspeisefähigen Umrichter ausgerüstet wird. Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz wird in einer laufenden Doktorarbeit untersucht, in dem im Zwischenkreis ein elektrischer Speicher für Rückspeisevorgänge eingesetzt wird.

Rückblickend auf dieses Teilprojekt kann festgehalten werden, dass alle Arbeitspunkte (AP 1...6) erfolgreich bearbeitet wurden und die Grundlage für weitergehende Forschungsarbeiten bilden. Durch die behandelte Fragestellung konnten über die Projektlaufzeit den beteiligten Industriepartnern die Simulations- und Messergebnisse zugänglich gemacht werden, so dass diese in Produktverbesserungen einfließen können. Weiterhin konnten durch den Ausbau der messtechnischen und simulationstechnischen Möglichkeiten neue Industriepartner gewonnen werden und neue Fragestellungen bearbeitet werden.

Ein neues Forschungsfeld zu Kleinantrieben, bei denen die Projektergebnisse einfließen werden, wurde im Februar 2015 gestartet. Dieses hat zum Ziel, Antriebe nicht nur unter dynamischen Gesichtspunkten zu regeln, sondern auch Energieeffizienzziele mit in die Regelalgorithmen zu implementieren. Die im Forschungsfeld entwickelten Verlustmodelle werden dabei eine wesentliche Grundlage für dieses neue Regelverfahren bilden und einen Beitrag zur elektrischen Antriebstechnik für Industrie 4.0 liefern. Zudem wurde in den Jahren 2014 – 2016 ein Projekt zur Energieeffizienzsteigerung von Gleichspannungswandlern erfolgreich durchgeführt. Auch in diesem Projekt dienten die entwickelten Modelle als Grundlage für die energetische Optimierung der Wandler und die Einbindung in Antriebsstränge.

2 Effizienzsteigerung bei elektrischen Maschinen

Im Projekt „Ermittlung der Zusatzverluste elektrischer Maschinen“ wurden die vereinbarten Ziele aus dem Projektantrag übertroffen. Im Rahmen des Projektes wurde termingerecht der aktuelle Stand der Forschung der analytischen Berechnung der Zusatzverluste im Netz- und Umrichterbetrieb umgesetzt. Zur messtechnischen Bestimmung der Zusatzverluste wurden mehrere Maschinenprüfstände errichtet (s. Abbildung 114). Mit Hilfe der Messungen wurden neue Berechnungsgrundlagen entwickelt und validiert. Die Berechnungsgänge wurden anhand einer großen Anzahl von Prüffeldmessungen (Anzahl der Messungen > 2000) validiert und stetig weiter entwickelt. Die gewonnen Erkenntnisse ermöglichen eine genauere Vorausberechnung der Zusatzverluste und somit eine Reduzierung der Verluste bzw. Steigerung der Energieeffizienz. Die Ergebnisse werden derzeit für neue Maschinenserien bei den Industriepartnern genutzt. Durch den großen Erfolg innerhalb des Projektes und die im Projektverlauf gewonnenen Ergebnisse konnten weitere Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie gewonnen werden. Diese wurden in neue Projekten in die Forschung eingebunden (s. Abbildung 113).

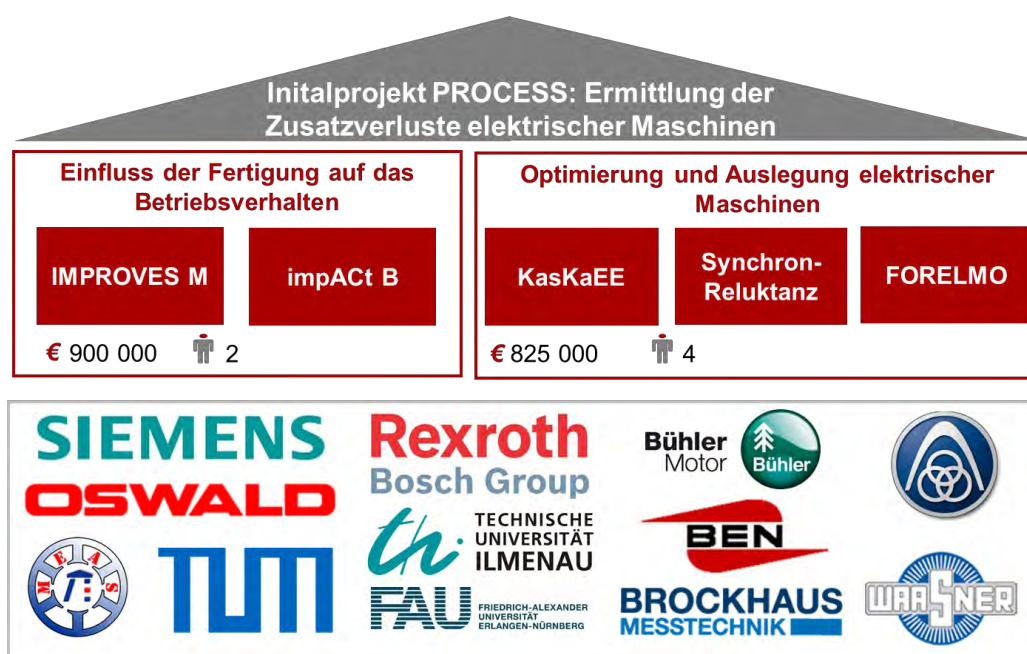


Abbildung 113: Übersicht der aus dem EnCN PROCESS angestoßenen Projekte und gewonnenen Kooperationspartner im Themenfeld Effizienzsteigerung bei elektrischen Maschinen

Ein neues Themenfeld, das durch das Teilprojekt „Ermittlung der Zusatzverluste in elektrischen Maschinen“ ermöglicht wurde, ist der Einfluss der Fertigung auf das Betriebsverhalten in elektrischen Maschinen. Im Rahmen dessen wurde ein Messplatz zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften unterschiedlicher weichmagnetischer Materialien im Projekt „IMPROVES M“ aufgebaut (s. Abbildung 115). Dieser ermöglicht unter anderem die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften der Materialien unter dem Einfluss mechanischer Spannungen. Darauf aufbauend wird im neuen Forschungsprojekt „impACT B“ innerhalb von drei Jahren der Einfluss des Schneidens und mechanischer Spannungen aufgrund von zylindrischen Pressverbänden auf Magnetisierungsstrom und Eisenverluste untersucht. Des Weiteren bestätigen zahlreiche kleinere Forschungsaufträge der Industrie die Notwendigkeit der Arbeiten auf diesem Gebiet. Im Rahmen der bisherigen Forschungen wurden bereits für mehrere Doktoranden verschiedener Universitäten sowie für eine Habilitation Messungen durchgeführt und der Stand der Forschung entscheidend vorangetrieben. Die Ergebnisse der Forschungen wurden auf Konferenzen und Tagungen der Wissenschaft vorgestellt. Der im EnCN Projekt eingerichtete Motorenprüfstand ermöglicht aufgrund seines für Hochschulen großen Betriebsbereichs (Leistung bis 400 kW) den Test von Prototypen über einen weiten Leistungsbereich. So konnten weitere Projekte zur Auslegung und Optimierung elektrischer Maschinen akquiriert werden.

Angesichts des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende werden neuartige und verbesserte Generatorkonzepte sowie eine hohe Qualität der Einspeisungen benötigt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wird im Forschungsprojekt „KasKaEE“ eine Kaskadenmaschine als Generator für die dezentrale regenerative Energieerzeugung ausgelegt, optimiert, gebaut und getestet. Im abgeschlossenen Projekt „Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer Antrieb ohne seltene Erden“ wurden mehrere Prototypen ausgelegt, gebaut und die Messergebnisse mit eigenen numerischen und analytischen Rechnungen verglichen (Industriepartner Bosch Rexroth). Durch Einsatz neuartiger Berechnungsmodelle und Messungen am Messplatz „IMPROVES M“ konnte eine sehr hohe Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Berechnungsmodellen erzielt werden. Hierdurch konnte die Energieeffizienz der Maschine durch die höchst genaue Vorausberechnung der Verluste und Betriebseigenschaften gesteigert werden. Das Projekt FORELMO zielt auf die kontaktlose Übertragung der Erregerleistung in den Rotor bei einer fremderregten Synchronmaschine ab. Im Rahmen des Projektes wurden neue Berechnungsgrundlagen mittels Reluktanznetzwerken entwickelt und mittels numerischer Simulationen validiert. Auf Basis der Berechnungsgrundlagen wurde bereits ein Prototyp gebaut und erfolgreich mit Fraunhofer IISB getestet.



Abbildung 114: Antriebsprüfstände bis eine Leistung von 400 kW



Abbildung 115: Messplatz „IMPROVES M“

3 Schlussworte

Durch die Forschungsarbeiten am EnCN im Themenfeld PROCESS ist es gelungen, die Verluste mechatronischer Antriebsstränge und im Besonderen rotierender elektrischer Maschinen genauer voraus zu berechnen. Die neu gewonnen Berechnungsgrundlagen und Modelle ermöglichen eine verbesserte Auslegung und Optimierung elektrischer Antriebssysteme. Das große Energieeinsparpotential der elektrischen Antriebe wurde praxisnah durch Erprobung und Einsatz bei den Industriepartnern bestätigt.

Durch neue Projekte und Industriepartnerschaften konnte das Personal von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern, die aus den Fördermitteln PROCESS gedeckt sind, auf sieben wissenschaftliche Mitarbeiter erhöht werden. Im Teilprojekt PROCESS konnten sechs kooperative Promotionen gestartet werden, von denen die ersten zwei voraussichtlich in 2017 abgeschlossen werden. Für die wissenschaftlichen Arbeiten wurde aus Fördermitteln die benötigte Messtechnik beschafft, insbesondere wurden Prüfstände bis zu einer Leistung von 400 kW errichtet. Ein neuer Messplatz zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektromotoren unterstützt die Forschungsarbeiten. Durch die bisherigen Arbeiten wurde der Grundstein für neue aussichtsreiche Themengebiete zur Einsparung von Energie in der elektrischen Antriebstechnik gelegt. Die im Teilprojekt PROCESS aufgebauten Kompetenzen werden intensiv von Industriepartnern genutzt, konnten über die Projektlaufzeit ausgeweitet werden und finden ihren nachhaltigen Niederschlag in vielfältigen Kooperationsprojekten zu elektrischen Antrieben.

4 Veröffentlichungen

- [1] Reinlein M.; Hubert T.; Hoffmann A.; Kremser A.: Optimization of analytical iron loss approaches for electrical machines, IEEE International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, 2013
- [2] Reinlein M.; Hoffmann A.; Hubert T.; Kremser A.: Systematic error of analytical iron loss approaches in electrical machines, GMM/ETG Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nuremberg, 2013
- [3] Dietz A.: Simulationssystem für elektrische Antriebssysteme, Cluster Mechatronik Workshop, TUM Garching, 2013
- [4] Hörlin S.; Dietz A.; Stahl K.; Otto M.; Zimmer M.: Systemgedanke umgesetzt - Simulation der Energieeffizienz eines mechatronischen Antriebsstranges, Digital Engineering 6/2013
- [5] Hörlin S.; Dietz A.: Simulation of energy in the field of electrical drive technology, ITI-Symposium, Dresden, 2013
- [6] Hörlin S.; Dietz A.: Antriebssysteme - So läuft es rund (Energetische Optimierung von Antriebssystemen an praktischen Beispielen), IHK Nürnberg WIM – Wirtschaft in Mittelfranken 2013
- [7] M. Reinlein, T. Hubert, T. Bauer, A. Kremser: Magnetic flux distribution between rotor and shaft in two-pole Induction Machines with axial cooling vents, 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Latvia, Riga, 2015
- [8] S. Wendel; et al. Predictive Control for fractional horse power drives (FHP), 10. ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems, 2015
- [9] M. Blank; et al. Evaluation of model based predictive control algorithms for fractional horse power drives, Green Factory Kolloquium, 2015
- [10] S. Hörlin, A. Dietz, M. Hubert, J. Franke: Energetic simulation of complex mechatronic drive systems over complete drive cycles, Green Factory Kolloquium, 2015
- [11] T. Hubert, M. Reinlein, A. Kremser, H.-G. Herzog: Preliminary design of reluctance synchronous machines using simplified magnetic circuit analysis, 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Latvia, Riga, 2015
- [12] T. Hubert, R. Steckel, M. Reinlein, A. Kremser, H.-G. Herzog: Nonlinear reluctance network method for Synchronous Reluctance Machine Analysis, 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Thailand, Pattaya City, 2015
- [13] T. Hubert, M. Reinlein, A. Kremser, H.-G. Herzog: Flexible Design of Synchronous Reluctance Machines using constrained Genetic Algorithm Optimization, 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Thailand, Pattaya City, 2015
- [14] T. Hubert, M. Reinlein, A. Kremser, H.-G. Herzog: Torque Ripple Minimization of Synchronous Reluctance Machines by continuous and discrete rotor skewing, 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Piscataway, NJ : IEEE Service Center, Nuremberg, 2015

BUILDING I

BETEILIGTE GRUPPEN

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Projektbericht EnCN1

Im Rahmen des Projektes BUILDING I wurde am Standort Nürnberg eine neue Arbeitsgruppe des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP aufgebaut und eine neue Professur „Systemintegration effiziente Gebäude“ an der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm (THN) geschaffen, die gleichzeitig die wissenschaftliche Leitung der Arbeitsgruppe übernimmt.

Die Arbeitsgruppe ist integriert in die Abteilung Energieeffizienz und Raumklima des Fraunhofer IBP und arbeitet an gewerke- und technologieübergreifenden Lösungen für einen nutzeroptimierten und energieeffizienten Gebäudebetrieb, insbesondere durch Entwicklungen im Bereich der Gebäudeautomation als Hauptschnittstelle zwischen den verschiedenen technischen Gewerken. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Durchgängigkeit der vorhandenen Informationen und Daten über und aus den Systemen der Gebäudeautomation und technischen Gebäudeausrüstung mithilfe neuer Datenmodelle. Auf Basis dieser Daten werden Verfahren zur Fehlererkennung und Diagnose im Gebäudebetrieb entwickelt und in der nachfolgenden Überwachung und Wartung angewendet.

Die Professur ist thematisch abgestimmt mit zwei weiteren neuen Professuren an der THN („Gebäudeintegration“ und „Energieeffiziente Systeme“), die im Rahmen des Projektes Building II entstanden.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Gunnar Grün
Fraunhofer-Institut für Bauphysik



E-Mail
Gunnar.Gruen@ibp.fraunhofer.de

Telefon
+49 911 / 56854 9144

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/zux56su>

1 Betriebsoptimierung von Gebäuden

Für den energieeffizienten Betrieb von Gebäuden gibt es verschiedene maßgebende Einflussfaktoren. Neben der Nutzung effizienter Systeme und ihrer passgenauen Auswahl und Dimensionierung (Faktoren, die vor allem in der Planung und Ausschreibung zum Tragen kommen) sind dies später vor allem die Sicherstellung eines fehlerfreien Betriebs der Anlagen, optimierte Einstellungen der Systemparameter in der Gebäudeautomation und die Berücksichtigung des Nutzerverhaltens im Gebäudebetrieb. Diese drei Faktoren sind auch im Gebäudebestand wichtige Optimierungsmöglichkeiten und nicht von Neubauten oder hohen Investitionen abhängig, um Energie effizienter zu nutzen.

In Industriegebäuden erschließt sich zusätzlich noch eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz: Wärmequellen und –senken aus dem Produktionsprozess können gezielt für die Gebäudeklimatisierung genutzt werden.

1.1 Fehlererkennung im Betrieb technischer Anlagen

Fehlerhaft arbeitende Systeme sind die Hauptursache für zu hohen Energieverbrauch in Gebäuden. Situationen wie gleichzeitiges Heizen und Kühlen oder durchgehend betriebene Ventilatoren oder Pumpen sollten eigentlich nicht vorkommen, finden sich in der Realität aber sehr häufig. In den letzten Jahren wurden verschiedenste Methoden zur Fehlererkennung im Betrieb technischer Anlagen entwickelt. Diese Algorithmen beinhalten das Erkennen eines Fehlers, die Feststellung der Ursache des Fehlers, die Bewertung der Schwere des Fehlers und die Beobachtung von dessen Einfluss über die Zeit. Sie werden eingeteilt in 3 Kategorien: qualitative modellbasierte Methoden, quantitative modellbasierte Methoden und datenbasierte Methoden. Erstere sind Expertensysteme, die den ursächlichen Zusammenhang zwischen Fehlern und Symptomen beschreiben. Bei quantitativen Methoden wird dieser Zusammenhang mit mathematischen Funktionen beschrieben. Bei den datenbasierten Methoden werden diese Zusammenhänge mit Hilfe historischer Daten und Algorithmen zur Mustererkennung erst ermittelt.

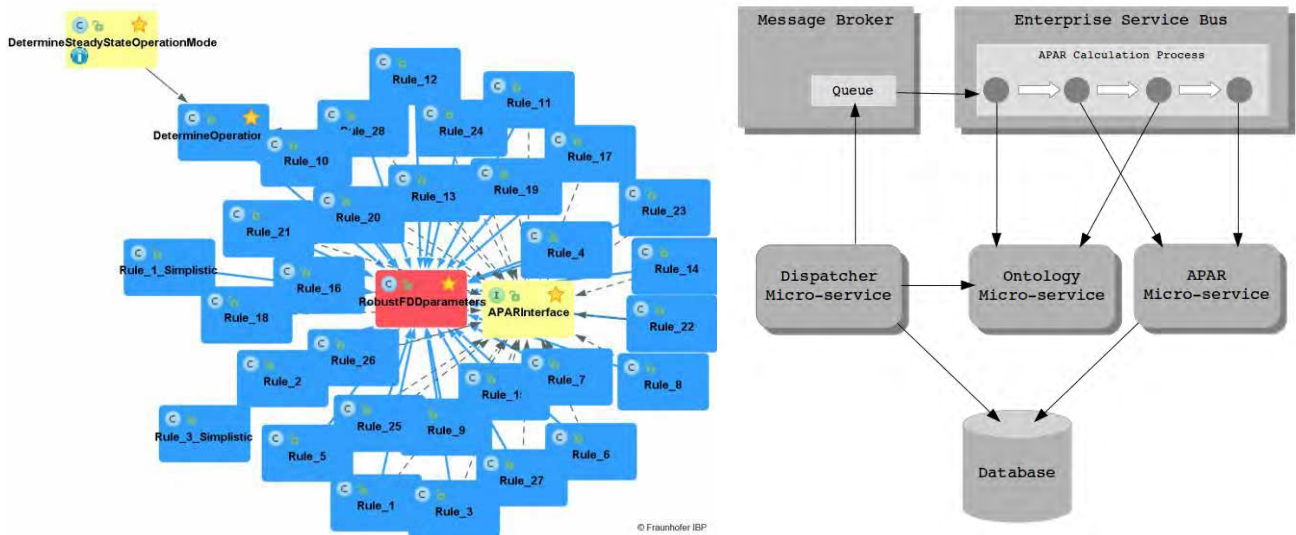


Abbildung 116: UML Klassendiagramm der APAR Java-Bibliothek und Flussdiagramm der Implementierung als Microservices.

Eines der anschaulichsten Beispiele für die qualitative modellbasierte Methode zur Fehlererkennung in Klimaanlage sind die ‚Air Handling Unit Performance Assessment Rules‘ (APAR). Basierend auf diesen Regeldefinitionen wurde innerhalb des Projektes BUILDING I eine Java-Bibliothek zur Fehlererkennung erstellt und ein automatisierter Prozess zu deren Auswertung auf einer Cloudplattform implementiert. Der Prozess kann sowohl auf historische Daten als auch auf aktuelle Messwerte angewendet werden. Wird eine Regel erfüllt, so wird dies als Symptom für einen Fehler interpretiert. Durch die Integration der Symptome über eine Stunde, wird eine Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet. Diese Vorgehensweise minimiert Fehlinterpretationen z. B. aufgrund fehlender Sensorwerte. Zusätzlich werden die wahrscheinlichsten Fehlerursachen zugeordnet. Die Bibliothek kann, kompiliert als jar-Datei, auf jeder beliebigen Analyseplattform in transparenter Weise ausgeführt werden. Die aktuelle Implementierung nutzt Microservices, die beliebig durch eigene und fremde Fehlererkennungs- oder andere Datenanalysealgorithmen ergänzt werden können. Das Flussdiagramm der Implementierung und ein Klassendiagramm der Bibliothek sind in Abbildung 116 abgebildet.

Die Verknüpfung der notwendigen Datenpunkte aus der Datenbank bzw. dem Gebäude mit den notwendigen Eingängen der Analysetools erfolgt dabei nicht manuell, sondern durch die Integration eines semantischen Informationsmodells (Ontologie, siehe 2.1), das alle Hintergrundinformationen zu den Datenpunkten enthält. Im Prozess werden die notwendigen Datenpunkt-IDs aus der Ontologie abgefragt und anschließend für die Datenabfrage aus der Datenbank verwendet.

Aktuell werden eigene Regelbasen zur Fehlererkennung von Kälte- und Heizungsanlagen erstellt und als weitere Microservices in die Plattform integriert.

Auch die Möglichkeit den Energieverbrauch von Gebäuden oder Systemen modellieren und vorhersagen zu können, bietet signifikante Einsichten in deren Verhalten und kann eine Vielzahl an Analysen unterstützen [166]. Mit einer derartigen Vorhersage kann z. B. ein ungewöhnlich hoher oder niedriger Verbrauch auf eine Fehlfunktion hinweisen. Die Modellierung kann außerdem dazu genutzt werden, das Verhalten des Gebäudes vor einer Renovierung zu beschreiben, um nach der Renovierung das Verhalten unter den aktuellen Randbedingungen zu berechnen und die tatsächlichen energetischen Einsparungen einzuschätzen. Für die Modellierung können verschiedene Modelltypen verwendet werden, von detaillierten Simulationsmodellen bis hin zu datenbasierten Black-Box-Modellen wie z. B. Neuronale Netze. In unserem Ansatz nutzen wir Gauss'sche Prozesse für Regressionen, sowohl für die Fehlererkennung als auch für die Bewertung von Sanierungsalternativen.

Für das Trainieren des Gauss'schen Modells werden 90% der Messwerte verwendet, zum Test des Modells die restlichen 10%. Die Genauigkeit des Modells mit Testdaten ist in Abbildung 117 dargestellt. Diese ist im Wesentlichen abhängig von den verfügbaren und ausgewählten erklärenden Parametern, wie z. B. Außenlufttemperatur oder Tageszeit etc.

Die Methodik zeigte eine ausreichende Genauigkeit und Robustheit, um den Energieverbrauch von Gebäuden vorherzusagen, auch wenn die erklärenden Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Modelle haben. Zusätzlich hängt die Methodik grundlegend von der Qualität der Mess- und Betriebsdaten im Gebäude ab.

Weitere Aktivitäten in diesem Forschungsbereich werden u. a. auch im EU-Projekt MOEBIUS (Horizon 2020) fortgeführt.

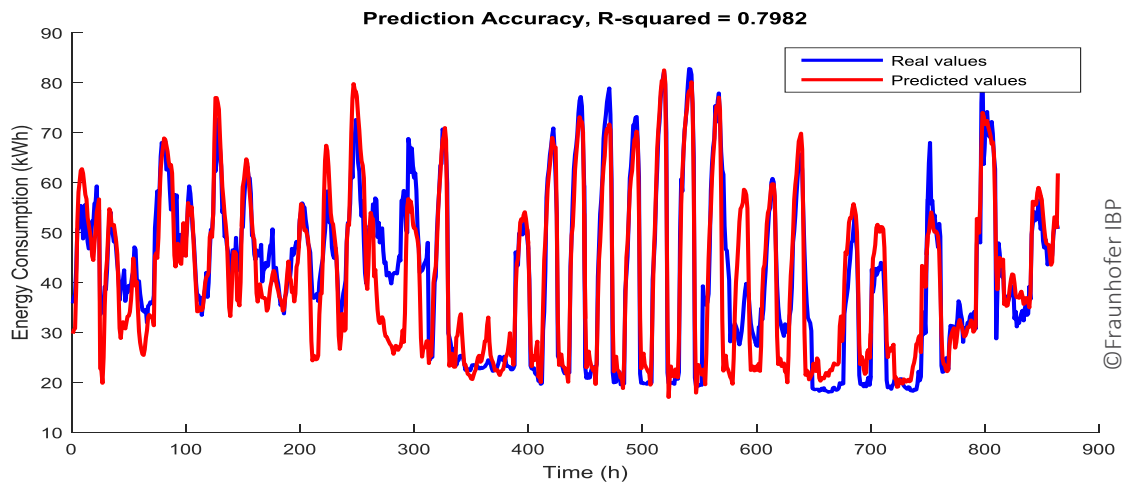


Abbildung 117: Vorhersagegenauigkeit des Gauss'schen Prozessmodells für eine stündliche Vorhersage des Energieverbrauchs.

Modellbasierte Optimierung der Gebäudeautomation

Die Erfahrung zeigt, dass auch in der passgenauen Einstellung von Systemparametern der technischen Gebäudeausrüstung, wie z. B. den Sollwerten, ein hohes Energieeinsparpotenzial liegt, welches meist sogar ohne nennenswerte zusätzliche Investitionen zu erreichen ist. In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze unterschiedlicher Komplexität zur Herleitung der optimalen Sollwerte. Einer dieser Ansätze ist die modellbasierte prädikative Regelung (Model Predictive Control, MPC). Diese errechnet mit Hilfe eines virtuellen Gebäudemodells zusammen mit Prognosen zu Wetterdaten oder Nutzungsprofilen eine optimale Strategie für den Gebäudebetrieb über ein festgelegtes Zeitfenster. Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung ist die Verfügbarkeit eines dynamischen Gebäudemodells mit speziellen mathematischen Eigenschaften, wie z.B. Linearität oder Quasi-Linearität, um übliche Optimierungsalgorithmen hinsichtlich der Zielparameter, z. B. minimale Energiekosten innerhalb definierter thermischer Raumklimagrenzen, nutzen zu können. Die Modellierung und Validierung eines solchen Modells (siehe Abbildung 118) für einen Gebäudeausschnitt in zahlreichen Varianten mit unterschiedlicher Witterung und geografischen Standorten zeigte zufriedenstellende Ergebnisse für die berechnete MPC-Betriebsstrategie am Beispiel einer thermoaktiven Decke [7][162].

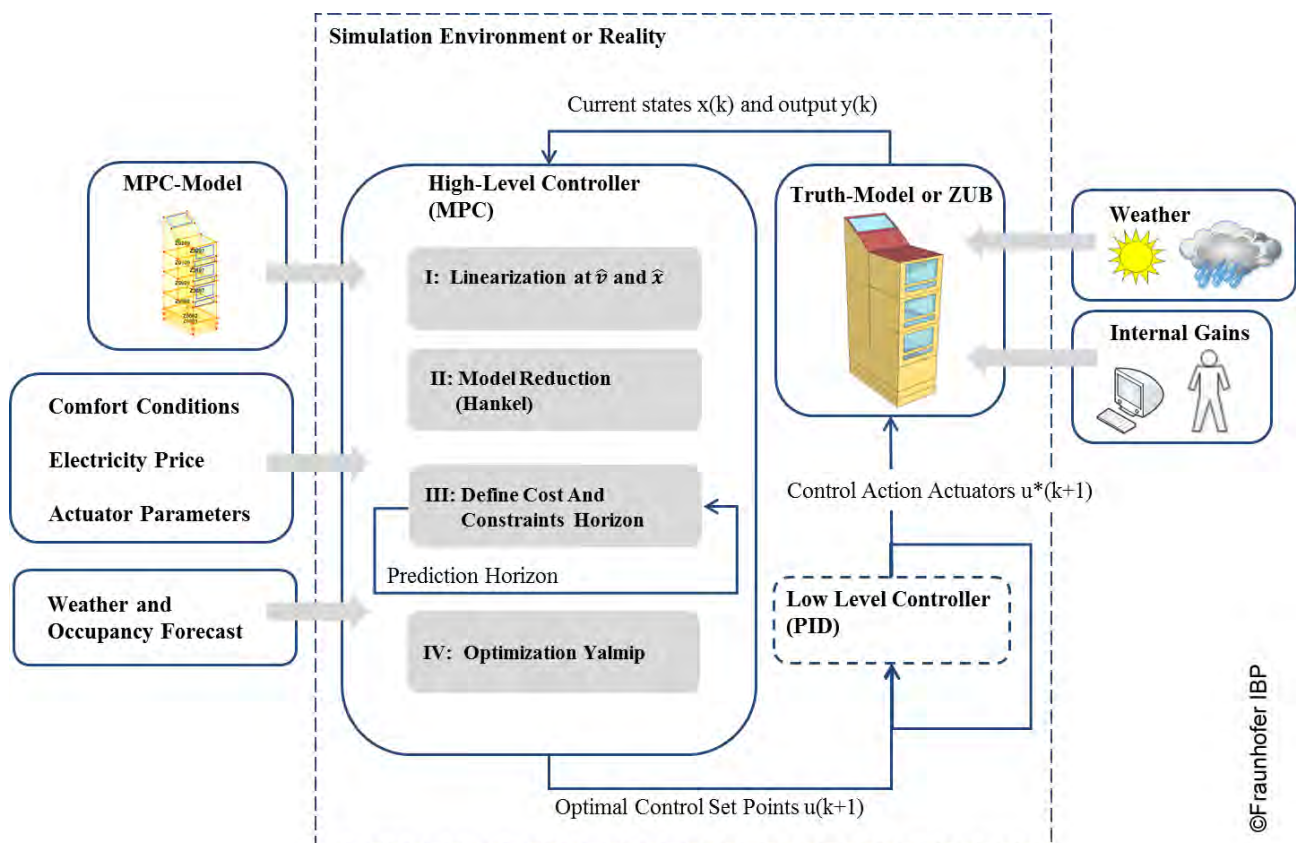


Abbildung 118: Optimierungsvorgang für Reglereinstellungen über ein linearisiertes Gebäudemodell.

Bei großen Gebäuden kann der Aufwand allerdings für die Erstellung eines linearisierten Modells zu aufwändig werden. Um dieses Problem zu umgehen, entstanden diverse Methoden, um entsprechende Modelle aus vorhandenen Betriebsdaten zu erstellen. Die Möglichkeiten, gebäudetechnische Systeme bis an die Grenzen auszutesten und entsprechende Betriebsdaten zu erhalten sind jedoch eingeschränkt, wenn man den Gebäudenutzern trotzdem behagliche Bedingungen gewährleisten werden sollen. Andererseits sind diese Modelle dann nur begrenzt für sämtliche Betriebszenarien extrapolierbar.

Der aktuelle Ansatz, der im EU-Projekt BaaS (FP 7) umgesetzt und getestet wurde, nutzt die in Gebäudeautomationssystemen integrierten Automationsfunktionen, deren Parameter normalerweise manuell durch das Technische Facility Management angepasst werden. Dabei werden die für das Gebäude bzw. alle Systeme relevanten Regelparameter identifiziert und optimiert. Die parametrische Modellierung der Regler ermöglicht eine Anpassung an alle möglichen Automationskonfigurationen und ermöglicht sogar, im Gegensatz zu klassischen MPC-Methoden, die Einbindung spezieller Automationsfunktionen, wie z. B. Zustandsreglern. Bei der Optimierung wird ein vereinfachtes Metamodell (Response Surface Modell) eines üblichen Simulationsmodells aus der Planungsphase erstellt, das einer Näherung dessen hinterlegter Funktionen entspricht und anhand dessen die Optimierung der Parameter erfolgt. Diese werden im nächsten Schritt anhand des umfassenden Simulationsmodells validiert (siehe Abbildung 119).

So ergibt sich schon nach wenigen Iterationen ein (lokales) Optimum der Parametereinstellungen. Bei der Umsetzung des Metamodells wurden verschiedene Methoden wie Support Vector Machines oder Global Optimization verwendet.

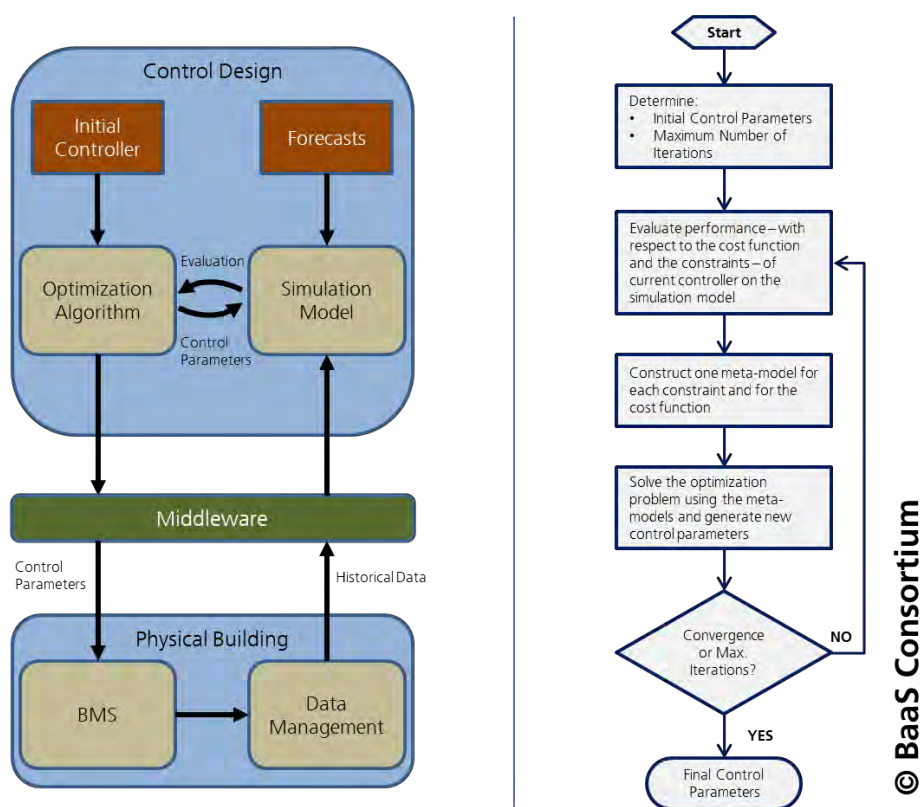


Abbildung 119: Optimierungsvorgang für Reglereinstellungen über ein Metamodell (Response Surface Modell).

Die Methodik wurde an zwei verschiedenen Demonstrationsobjekten (Bürogebäude) im Projekt BaaS während einer Heizperiode angewendet. Das erste ist ein sehr schweres Gebäude mit thermoaktiver Decke in Deutschland. Es zeigte sich eine Energieeinsparung der thermischen Energie bis zu 33 % im Vergleich zur ursprünglich installierten Betriebsstrategie, die eine Anpassung der Vorlauftemperatur mit Hilfe einer Heizkurve und eine konstante Raumsolltemperatur von 21 °C vorsieht. Das zweite Gebäude, in Griechenland, hat eine wesentlich leichtere Konstruktion. Die untersuchten Räume haben unterschiedliche Ausrichtung, Fensterlüftung und werden mit Radiatoren beheizt. Durch den großen Einfluss der Nutzer auf die Klimatisierung der Räume zeigte die Methodik hier keine Verbesserung des Energieverbrauchs. Es konnte noch nicht einmal die Einhaltung objektiver Komfortkriterien sichergestellt werden. Vielmehr zeigte sich hier die Notwendigkeit zur Erkennung fehlerhafter Betriebseinstellungen, wie z. B. Heizen bei geöffneten Fenstern, und zur Modellierung des Nutzerverhaltens.

1.2 Integration des Nutzerverhaltens

Wie im vorangegangenen Absatz beschrieben, ist das Nutzerverhalten in einem Gebäude einer der Haupteinflussfaktoren auf dessen Energieverbrauch. Die Möglichkeit, das Verhalten zu modellieren und vorherzusagen, ermöglicht eine Anpassung der Regelung

an den Nutzer und somit eine Vermeidung von dem Nutzerverhalten widersprechender Betriebsstrategien. Am Beispiel des visuellen Komforts werden Nutzergruppierungen vorgestellt, die anhand gemessener Daten aus der Gebäudeleittechnik eines realen Bürogebäudes im Projekt BUILDING I entwickelt wurden. Das Gebäude ist nach Süden orientiert mit großen verglasten Flächen und motorischem Sonnenschutz, steuerbar für jeden Raum. Wie in den meisten anderen Gebäuden wird die Interaktion des Nutzers zur Steuerung des Sonnenschutzes und der elektrischen Beleuchtung nicht erfasst. Ersatzweise werden die aufgezeichneten Messwerte von Helligkeitssensoren in den Räumen verwendet. Dazu wird ein Sprung der Helligkeit von mehr als 50 Lux als Nutzerinteraktion mit dem System und die vorangegangene Helligkeit als Trigger für diese Interaktion gedeutet. Diese Sets an Triggern für jedes Büro werden in Cluster eingeteilt. Die Daten ergaben zwei Gruppierungen (siehe Abbildung 120) mit unterschiedlichen Interaktionsverhalten der Nutzer.

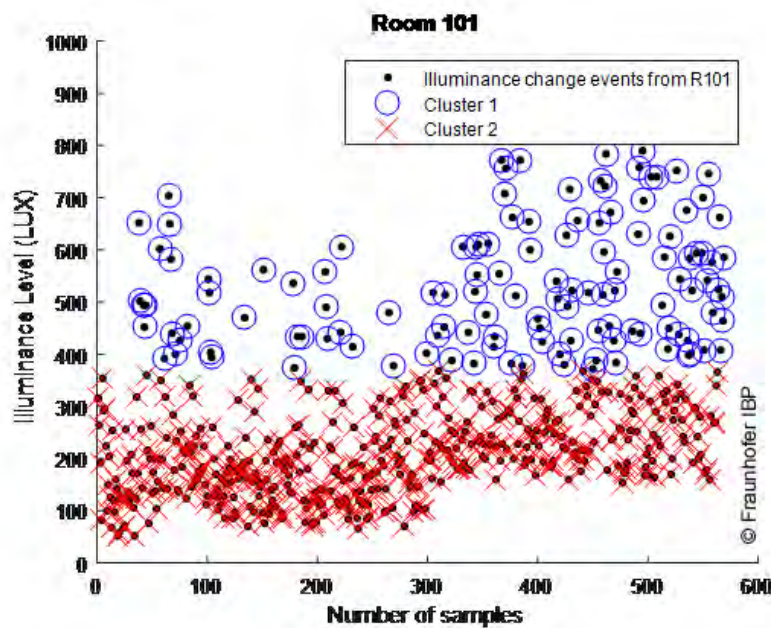


Abbildung 120: Cluster für visuellen Komfort in einem Beispielsbüro.

In einem nächsten Schritt werden die Zentren der zwei Cluster für alle Büros wieder mit einer Clusteranalyse eingeteilt. Diese führte zu den Nutzertypen für die Beleuchtung, mit den jeweiligen unteren und oberen Grenzen für die präferierte Helligkeit.

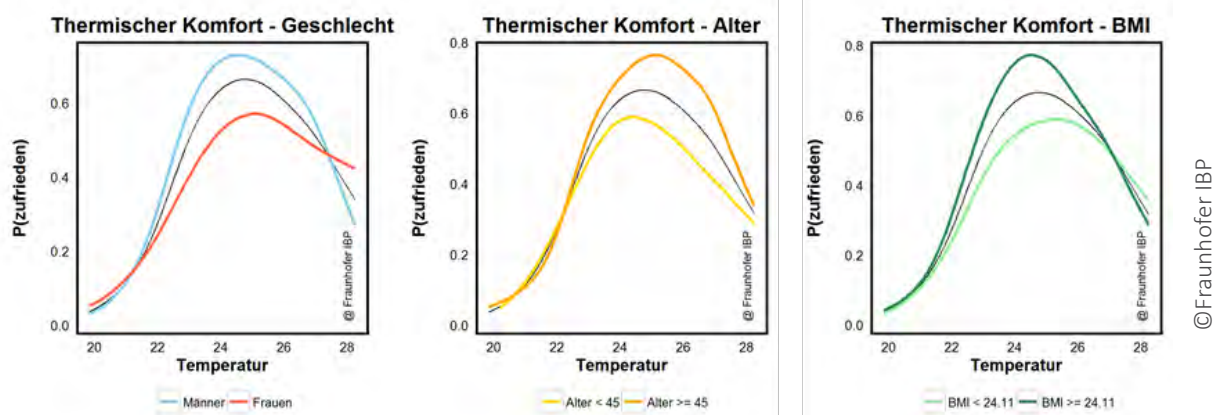


Abbildung 121: Unterschiedliche thermische Komfortpräferenz nach Geschlecht, Alter und BMI.

Auch in der Planung ist bereits eine adäquate Berücksichtigung des Nutzerverhaltens von fundamentaler Bedeutung. Im Projekt ValMoNuI werden deshalb stochastische Nutzerverhaltensmodelle entwickelt, um diese Modelle prototypisch zur Vorhersage des Nutzerverhaltens in einer Simulationsumgebung zu implementieren. Der Schwerpunkt des Teilvorhabens am Fraunhofer IBP liegt auf der Ableitung der Nutzertypologien hinsichtlich Bedienbarkeit von Gebäudesystemen und einer Untersuchung der Schnittstelle für die Integration der Nutzerverhaltensmodelle in die Gebäudesimulation und -automation. Die Hypothese dabei ist, dass

es verschiedene Nutzergruppen gibt, die aufgrund unterschiedlicher Vorbildung, Erfahrung und/oder Erwartungen an das Raumklima, die zugehörigen Gebäudesysteme unterschiedlich bedienen und andere Anforderungen an die Interaktion mit dem Gebäude haben. Um diese Nutzertypologien zu erkennen werden Querschnittstudien anhand von Umfragen durchgeführt. Die entstandenen Typologien mit ihren jeweiligen Präferenzen können verwendet werden, um die jeweils unterschiedlichen Bedürfnisse hinsichtlich des Gebäudebetriebs zu klassifizieren und die relevanten Parameter der für den energieeffizienten Betrieb zu schärfen. Dafür wurde eine erste Querschnittstudie im Sommer 2016 durchgeführt und die in Literatur vorhandenen verschiedenen Nutzerverhaltensmodelle in die Simulationsumgebung integriert (siehe Abbildung 121). Aus dieser Aktivität wurde die Anforderung an die Nutzerverhaltensmodelle für die Anwendung in der Gebäudesimulation festgestellt.

1.3 Optimierungsstrategien für die technische Gebäudeausrüstung in Industriegebäuden

Üblicherweise wird die technische Gebäudeausrüstung im Planungsprozess für Produktionsstätten unter Berücksichtigung der auftretenden Lasten – also unter Zuhilfenahme bekannter Größen für Produktionsprozesse, wie z.B. Leistungsaufnahme der Maschinen - in der Art ausgelegt, dass mit einem bestimmten Sicherheitsbeiwert der Produktionsraum mit Maßgabe höchster Betriebssicherheit konditioniert werden kann. In der Regel wird somit im Betrieb mehr Leistung für die Konditionierung einer Fertigungshalle vorgehalten als möglicherweise notwendig wäre. Mit der genauen Kenntnis der tatsächlich auftretenden Lasten ist es möglich, thermische Lasten, welche Produktionsmaschinen an die Raumluft abgeben in das Betriebskonzept der Regelung für die Beheizung, Lüftung und Kühlung zu integrieren und somit eine bessere bedarfsangepasste Betriebsweise der technischen Gebäudeausrüstung zu gewährleisten. Neben der erwarteten Energieeinsparung durch die optimierte Bedarfsanpassung der Raumkonditionierung führt die Lastspitzenreduktion zu einer Vergleichmäßigung des Energiebedarfs, und somit zu einer direkten Kostenreduktion in Folge der Senkung der Leistungsbereitstellung.

Es gibt verschiedene rechnerische Verfahren, die den thermischen Wärmeeintrag durch die Verlustleistung der einzelnen Komponenten der Maschine mit Hilfe von numerischen Modellen beschreiben. Die Berechnungen werden überwiegend mit dem Fokus der thermischen Stabilität des Prozesses durchgeführt, sind extrem komplex und für den Anwendungsfall kaum praktikabel. Ziel des Projektes war demnach, den thermischen Eintrag von Produktionsprozessen messtechnisch zu erfassen, um somit eine Korrelation zwischen gemessenem Wärmeeintrag und aufgenommener Leistung (meist Strom) zu beschreiben.

Aufgrund der hohen Abwärme aus Urform- und Umformprozessen, sowie auch bei der Änderung von Materialeigenschaften bei vergleichsweise hohen Temperaturen, ist für diese Fertigungsverfahren die direkte Nutzung von Abwärme durch Wärmerückgewinnung die bedeutendste Methode für eine Energieeinsparung in der Produktion auf der Seite der technischen Gebäudeausrüstung.

Am Beispiel eines spannenden Fertigungsprozesses, welches die Bearbeitung eines Turbinenbauteils vom ersten Prozessschritt (Formfräsen, Schruppen) bis zur Fertigstellung des Bauteils (Präzisionstrennen, Schlichten) umfasst, werden alle wesentlichen thermischen Größen gemessen, die in Interaktion mit der Raumluft treten. Um eine Korrelation zwischen thermischem Energieeintrag an den Raum und der aufgenommenen Maschinenleistung herstellen zu können, müssen gleichermaßen diejenigen Stoffströme erfasst werden, die entweder direkt oder indirekt zur Kühlung der Maschinenkomponenten oder des Werkstücks dienen. Aus den ermittelnden Messdaten werden thermische Lastprofile erstellt, die den zeitlich aufgelösten Verlauf des Wärmeeintrags über die aktuell aufgenommene elektrische Leistung der Maschine zeigt. Mithilfe dieser Lastprofile können im Nachgang spezifische thermische Profile zur Betriebsoptimierung der Klimatisierung genutzt werden.

2 Informationsmodelle/Wissensrepräsentation für Gebäude

Viele der aktuellen Entwicklungen zur Optimierung von Energieeffizienz in Gebäuden, insbesondere die bereits genannten Analysen von Mess- und Betriebsdaten aus Gebäuden, benötigen für ihren Einsatz detaillierte Informationen über das Gebäude, den darin installierten Systemen und deren Betriebsweisen. Aktuelle vorhandene Informationen aus der Planung sind, auch in digitaler Form, meist nicht dazu geeignet, um diese Informationen ohne zusätzliches Expertenwissen automatisiert für derartige Funktionen zur Verfügung zu stellen. Noch gravierender ist Situation in bestehenden Gebäuden, wo oft die nötigen Informationen nicht oder nur in Form von Zeichnungen oder textuellen Beschreibungen verfügbar sind.

2.1 Semantisches Informationsmodell für die Logik der Gebäudeautomation

Gebäudeautomationssysteme (GA-Systeme) können einen wichtigen Beitrag zur Senkung des Energiebedarfs in Gebäuden leisten. Dies wird zum einen dadurch realisiert, dass automatische Regelalgorithmen verwendet werden, um zum Beispiel die Temperatur in einem Raum über Nacht abzusenken und am nächsten Morgen bevor der Nutzer den Raum betritt wieder anzuheben. Andererseits erlauben GA-Systeme das Monitoring von Anlagen und Systemen. Mithilfe dieser Betriebsdaten besteht die Möglichkeit, Fehlverhalten zu erkennen und abzustellen und so Energie zu sparen.

Allerdings erfordert die Einrichtung dieser Fehlererkennungsalgorithmen eine Fülle von Informationen und Fachwissen von Experten. Die nötigen Informationen umfassen die Topologie eines Gebäudes, die jeweiligen technischen Anlagen, die Sensoren zum Erfassen des jeweiligen Betriebszustandes und deren korrespondierender Datenpunkt in der Gebäudeautomation. Zusätzlich muss bekannt sein, welche Regelalgorithmen und übergeordneten Betriebsweisen für die Automatisierung verwendet werden. Vielfach werden diese Informationen mit großen Aufwand aus Beschreibungen, Anlagenschemata, Plänen und Datenpunktlisten gesucht und ‚manuell‘ mit den verschiedenen Fehlererkennungsalgorithmen verknüpft. Dies ist umso aufwändiger, je heterogener das System ist. Dafür ist die Spezifikation der realisierten Gebäudeautomationsfunktionen in vielen Fällen sehr hilfreich [171]. Ein umfassender modell-basierter Informationsaustausch ist aber mit aktuellen Planunterlagen der Gebäudeautomation wie z. B. Schaltplänen und Datenpunktlisten derzeit nicht möglich.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, werden im Rahmen einer Doktorarbeit Informationsmodelle entwickelt, die es erlauben explizit die Regelungslogik einer Automationslösung abzubilden. Damit wird die Lücke in den bereits bestehenden Informationsmodellen im Gebäudebereich geschlossen, die das Beschreiben von Gebäudeelementen, wie Wände und Fenster und technische Anlagen, wie z.B. Raumlüftungsanlagen bereits erlauben.

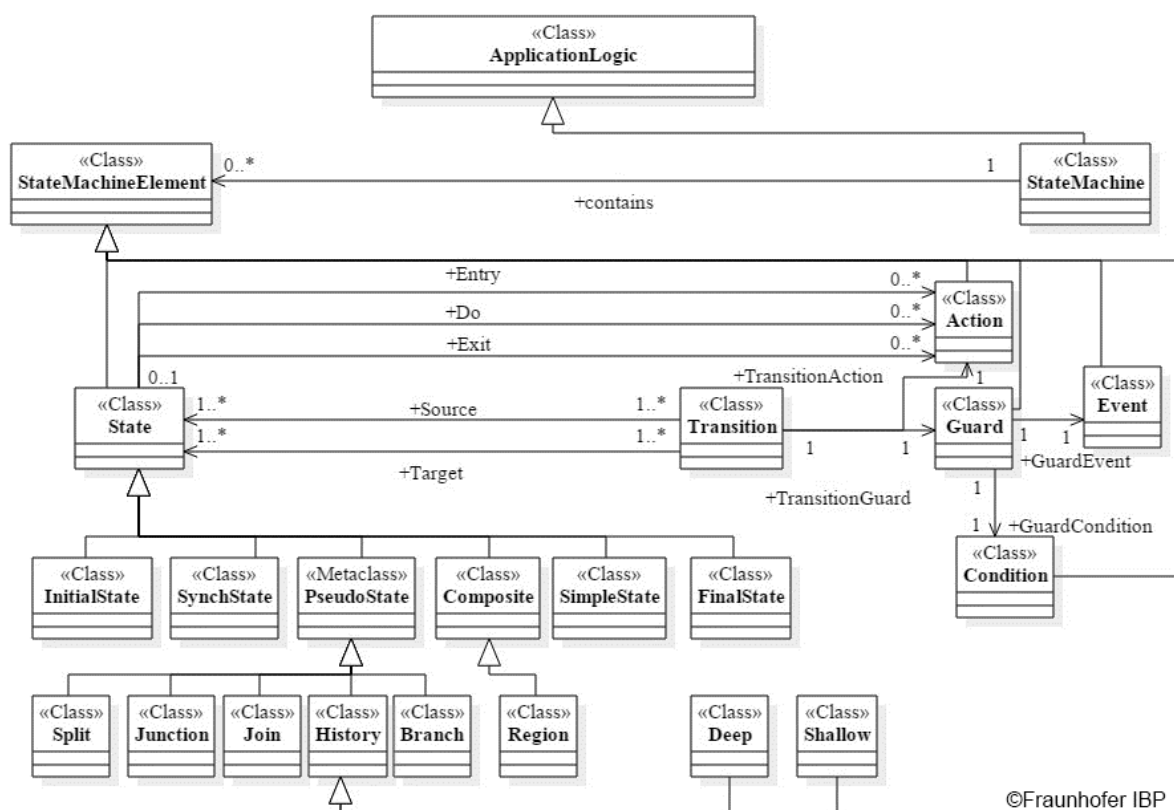


Abbildung 122: Klassendiagramm einer Ontologie zur Beschreibung von Zustandsautomaten der Unified Modelling Language [UML].

Für die explizite Beschreibung von Regelungslogik werden Ontologien verwendet. Ontologien erlauben es einen bestimmten Sachverhalt formal eindeutig zu beschreiben, indem Konzepte und deren Beziehungen zu einander definiert werden. Eine große Stärke von Ontologien ist es, dass sie einfach mit anderen Daten und Informationen aus dem Internet, wie zum Beispiel Wetter oder statistischen Daten verknüpft werden können.

2.3 Integration von Bedarfsanforderung aus dem Facility Management

Der Gebäudebetrieb hat einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden. Das dafür verantwortliche Technische Facility Management (TFM) steht aber regelmäßig vor der Herausforderung, dass relevante Anlageninformationen nicht oder nur in unzureichender Qualität vorhanden sind. Das verursacht einen hohen zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand für die Betreiber.

Die Erstellung von Gebäudeinformationsmodellen und damit verknüpfte Prozesse, die in letzter Zeit auf immer mehr Interesse stoßen, fördern einen besseren Austausch zwischen allen Baubeteiligten und könnten einige dieser Probleme lösen. Allerdings werden sie im Moment meist nur für die Planungsphase verwendet. Im Rahmen einer Doktorarbeit wird deswegen eine Methodik entwickelt, das Anforderungen aus dem Gebäudebetrieb an das Gebäude und die Informationen darüber bereits für die Planungsphase verfügbar und somit einen verbesserten Informationsfluss bis in den Gebäudebetrieb hinein möglich macht.

Eine Umfrage innerhalb der Branche in Deutschland zeigt, dass der größte Teil der Mitarbeiter (fast 90 %) Gebäudeinformationsmodelle und die dazugehörigen Prozesse kaum kennen [10] [153]. Trotzdem erwarten sie von der Methodik große Vorteile, unter anderem: Verfügbarkeit von digitalen Assets, besseren Zugang zu den Informationen über die technischen Anlagen und ihre Automation, einfacheren Umgang mit dem Bestand bei Änderungen des rechtlichen Rahmen, sowie weitere Verbesserungen der Managementaktivitäten (z.B. Flächen, Notfall etc.). Das größte Hindernis wurde in der dadurch notwendigen Kommunikation der Nutzeranforderungen mit allen Baubeteiligten gesehen.

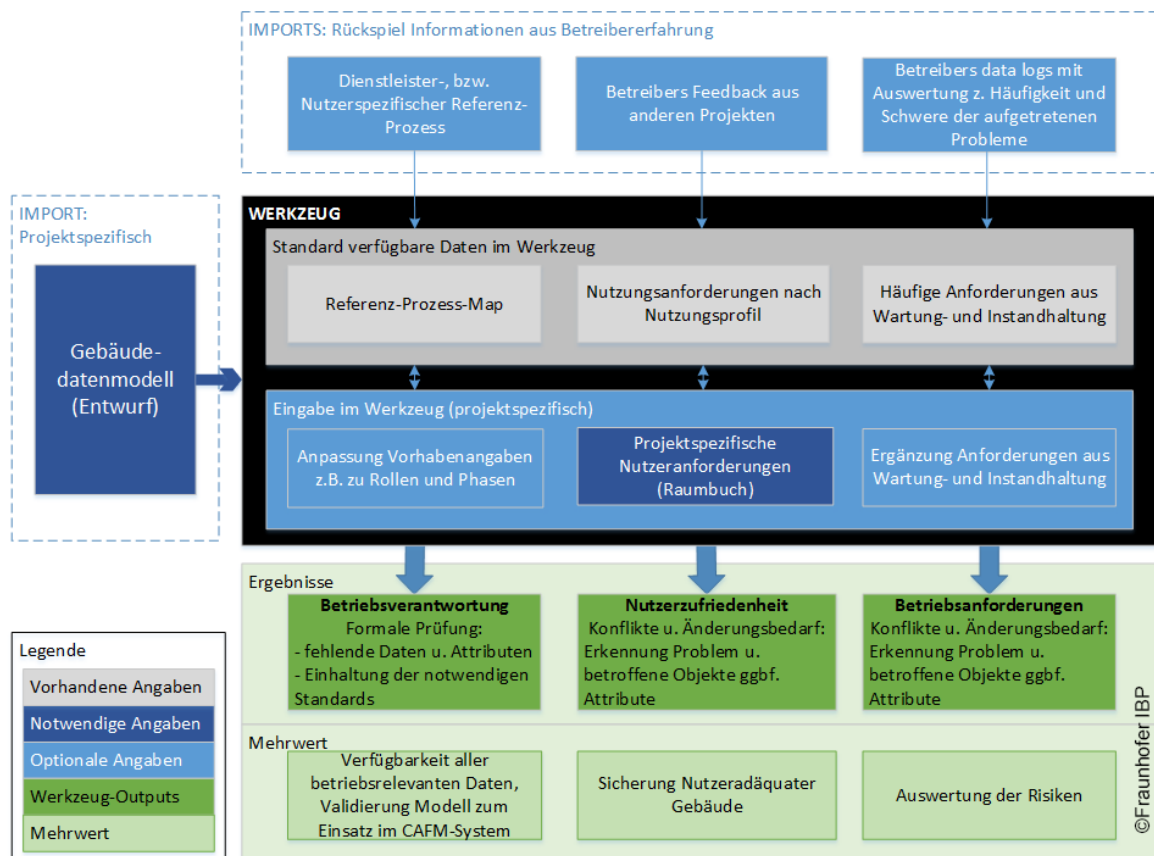


Abbildung 124: Prüfungsverfahren der FM-Anforderungen für die Planungsphase mit Übersicht der benutzen und erzeugten Angaben.

Zur näheren Beschreibung der Funktionalitäten wurden Fachexperten nach konkreten technischen Anforderungen befragt. Dabei wurde auch die Integration des TFMs in das Planungsteam diskutiert. Die Ergebnisse der Befragung unterstreichen die Notwendigkeit eines abgestimmten Datenmanagements, sowie einer frühzeitigen Mitwirkung am Bauvorhaben, bereits zu Beginn der Planung. Des Weiteren wurden mit den Experten Ideen von technischen Lösungen während der Planungsphase diskutiert, wie z. B. der Einsatz eines dynamischen Lebenszykluskostenrechners, der alle Planänderungen und Varianten automatisch auch in ihren Auswirkungen auf die Betriebskosten visualisiert. Auch die Prüfung der Planung hinsichtlich der Einhaltung regulatorischer Vorgaben wäre für die Betreiberverantwortung von Vorteil.

Anhand der Befragungsergebnisse konnte das ursprüngliche Verfahren der Methodik bestätigt und um weitere Prüfungsarten erweitert werden. Abbildung 124 zeigt einen Überblick der gewünschten Prüfungsmoden und deren erwarteten Ergebnissen, sowie die Quellen der notwendigen Angaben. Datenbanken sollen schließlich mit Datenbanken verknüpft werden, die generische Daten zum Prozess und zu Nutzer- und Betriebsanforderungen enthalten. Diese Daten sollten mit projektspezifischen Angaben ergänzt werden. All diese Daten dienen dazu, das Gebäudedatenmodell entlang der Entwurfsphase gegen die Nutzer- und Betriebsanforderungen zu prüfen. Anhand des Referenz-Prozesses kann auch die Verfügbarkeit aller betriebsrelevanten Daten und die Einhaltung der regulatorischen Vorgaben geprüft werden.

Die Datenmodelle und -inhalte zu den Nutzer- und Betriebsanforderungen werden anhand von Literaturrecherchen und Beiträgen von Experten definiert. Ein datenbankbasierter Prozess wird als Referenz anhand vorhandener Normen und Richtlinien entwickelt. Allerdings bestehen noch Unklarheiten in Bezug auf die Anforderungen aus manchen Regelwerken. So sind einige Dokumente aus der Planungsphase notwendig im Rahmen Betreiberverantwortung, ohne dabei klarzustellen, wer dessen verantwortlicher Ersteller ist, oder ob es sich überhaupt um verpflichtende Planungsleistungen handelt. Zur Klärung dieser offenen Punkte ist deshalb die Einbindung von Fachexperten der gesamten Baubranche notwendig.

Eine Machbarkeitsstudie soll überprüfen, ob die Methodik sich operativ in den Planungsablauf in Form eines Werkzeugs implementieren lässt und ob es die notwendigen Schnittstellen zu existierenden Technologien besitzt. Vor allem eine mögliche Anbindung des Informationsaustauschformat CAFM-Connect oder an Systeme zur Raumbuchentwicklung sowie bereits vorhandene Modell-Prüfungssoftware liegen dabei im Fokus.

3 Hardwareintegration neuer Systeme

3.1 Behaglichkeitssensorik für die Gebäudeautomation

In der Gebäudeautomation wird bis jetzt ausschließlich die Lufttemperatur zur Regelung technischer Raumklimasysteme verwendet, obwohl für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit weit mehr Größen, wie z. B. Luftgeschwindigkeit und Strahlungstemperatur, entscheidend sind. Das liegt vor allem an der fehlenden Möglichkeit, alle Randbedingungen mit einem einzigen und einfachen Sensor zu erfassen. Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP werden seit Jahren Sensoren entwickelt, welche die Messungen des Innenraumklimas in Gebäuden, Fahr- und Flugzeugen anhand einer thermischen Summengröße ermöglichen. Teil dieser ist ein Komfortsensor, der für die Messung der Äquivalenttemperatur entwickelt wurde. Die Äquivalenttemperatur ermöglicht die thermischen Umgebungsbedingungen mit nur einem Zahlenwert zu beschreiben und erlaubt so eine vergleichbare Bewertung unterschiedlicher Klimaszenarien.

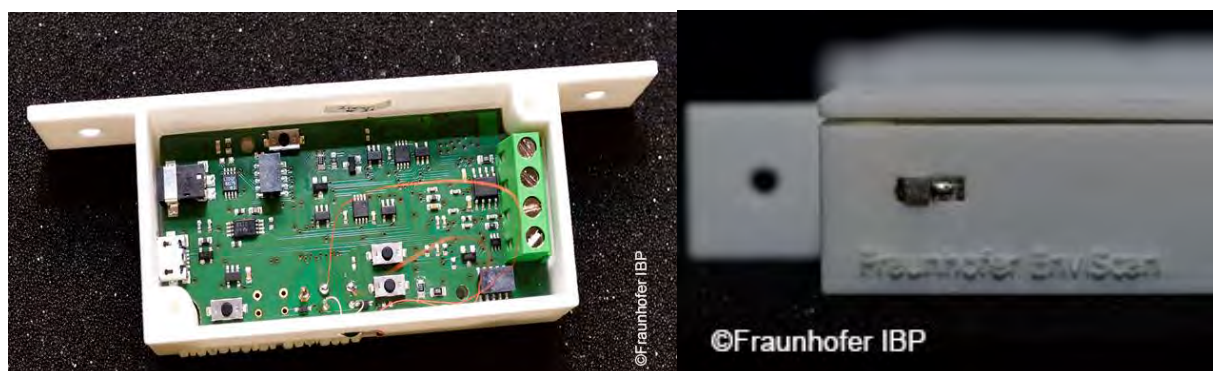


Abbildung 125: Miniaturisierter und funkbasierender Behaglichkeitssensor für die Gebäudeautomation.

Nun wurde dieses Messprinzip für den Einsatz in der Gebäudeautomation weiterentwickelt [8]. Die Entwicklung des Systems umfasst die Verkleinerung der Elektronik zur Regelung der verschiedenen Wärmeströme und Temperaturen, zur energieautarken Energieversorgung und zur Erfassung der Messwerte. Einhergehend beinhaltet die Softwareentwicklung die Umsetzung der Regelungsaufgaben, eines energieeffizienten Betriebs, und der Übertragung der Messwerte mittels Funktechnologie (siehe Abbildung 125). Die Anbindung erfolgt über die Funktechnologien von EnOcean und ZigBee.

Erste Prototypen wurden bereits im Labor untersucht und validiert. Die verbesserte Version wird aktuell im EnOB-Projekt „a-electra“ zur einfachen Messung der thermischen Behaglichkeit eingesetzt. In diesem Projekt wird ein System zur elektrischen Strahlungsheizung im Vergleich zu Nachtspeicheröfen untersucht.

In einem weiteren Projekt, im Rahmen des E|Home-Centers erfolgt zusammen mit dem Smart-Home Hersteller alphaEOS die Anpassung und Integration in ein reales System zur intelligenten Heizungssteuerung [171].

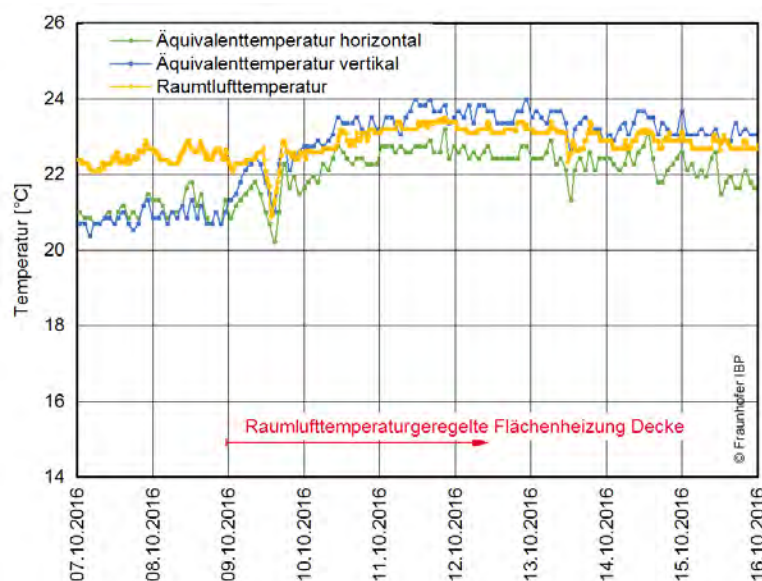


Abbildung 126: Messungen der gerichteten Äquivalenttemperatur in einer Wohnung mit Deckenheizung.

4 Schlussworte

Im Projekt BUILDING I wurde die Arbeitsgruppe „Gebäudesystemlösungen“ mit aktuell 4 Mitarbeitern aufgebaut und die Professur „Systemintegration effiziente Gebäude“ an der THN eingerichtet. Dort ist ein weiterer wissenschaftlicher Mitarbeiter eingebunden. Mit dem EU-Projekt MOEEBIUS, das Ende 2015 gestartet ist, ist eine enge fachliche Zusammenarbeit zwischen THN und IBP-Mitarbeitern gewährleistet. Während der Projektlaufzeit wurden 6 studentische Arbeiten abgeschlossen, aktuell sind noch 2 weitere in Bearbeitung. Zusätzlich wurden zwei Doktorarbeiten gestartet, mit deren Abschluss jedoch erst nach Ablauf des Projektes zu rechnen ist.

5 Veröffentlichungen

- [1] K. Macek, J. Rojicek, G. Kontes, D. Rovas: Black-box Optimisation for Buildings and its Enhancement by Advanced Communication Infrastructure. *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, 1 (5), 53-64, 2013.
- [2] K. Buvik, S. Steiger: Selected Publications and Projects about Energy Efficiency and Indoor Environment Quality. In: Report of „School of the Future – Towards Zero Emission with High Performance Indoor Environment“. EU 7th Framework Programme, Project Number 260102 published on www.school-of-the-future.eu, 2013.
- [3] G. Grün, G. Benitz: Aufs Kühlen kommt es an. *Mensch & Büro*, 1, 44–45, 2013.
- [4] G. Grün, S. Urlaub: Towards an identification of European indoor environments' impact on health and performance - homes and schools. Fraunhofer IBP – White Paper, 2014.
- [5] G. Kontes, C. Valmaseda, G. Giannakis, K. Katsigarakis, D. Rovas: Intelligent BEMS design using detailed thermal simulation models and surrogate-based stochastic optimization. *Journal of Process Control*, 24 (6), 846 – 855, 2014.
- [6] S. Steiger, S. Park, H. Erhorn, J. de Boer: Improved indoor environmental quality – Retrofit guidelines towards zero emission schools with high performance indoor environment, EU 7th Framework Programme, Project Number 260102 published on www.school-of-the-future.eu, 2014.
- [7] M. Blanck. Design and evaluation of an energy management system based on a model-predictive control approach. Masterarbeit an der Technischen Universität München, 2015.
- [8] M. Deschler. Entwicklung eines Sensorsystems für einen funkbasierten Raumklimasensor zur Integration in die Gebäudeautomation. Bachelorarbeit an der Technischen Hochschule Ingolstadt, 2015

- [9] A. Michaelis. Entwicklung einer Testumgebung zur Energieeffizienzmessung intelligenter Raumtemperatur Regelungen, Bachelorarbeit an der Fachhochschule Jena, 2015.
- [10] A. Bougain. Definition of the needs for enhanced building operation using Building Information Modeling (BIM). Praxisreport 2015: Integrale Planung für Industriebau 4.0, TU Wien, 2015.
- [11] G. Grün, S. Urlaub: Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe. Fraunhofer IBP - Studienbericht, 2015.
- [12] M. Winkler, W. Jensch, G. Grün, K. Sedlbauer: Niedrigstenergiegebäude im Bildungssektor: Nutzung gebäudetechnischer Systeme vermeidet Überhitzung im Winter. GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, 136 (3), 152–165, 2015.
- [13] G. Grün, S. Urlaub: Wie der Raum das Lernen bestimmt. SCHULBAU Bauen für Bildung, 4, 4–6, 2016.
- [14] G. Grün, S. Urlaub: Towards an identification of European indoor environments' impact on health and performance - Mould and Dampness. Fraunhofer IBP - Studienbericht, 2016.
- [15] M. Madarapu: Development of Hardware-in-Loop (HIL) System to Evaluate the Energy Efficiency of Smart Home Systems. Masterarbeit an der Jawaharlal Nehru Technological University, Indien, 2016.
- [16] P. Noisten, A. Tan, T. Kirmayr, G. Grün: Definition of a building design process as guidance for an appropriate choice of technologies and including innovation and risk management. In: U. Rickers (Hrsg.): Lake Constance 5D-Conference 2015 Proceedings, 88-97, 2015.
- [17] K. Katsigarakis, G. Kontes, G. Giannakis and D. Rovas, "Sense-Think-Act Framework for Intelligent Building Energy Management", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Volume 31, Issue 1, 50-64, 2016.
- [18] S. Urlaub, G. Grün: Mould and dampness in European homes and their impact on health. Fraunhofer IBP - Projektbericht: EER-058/2016/950, 2016.

BUILDING II

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Department Chemie- und Bioingenieurwesen (CBI) Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik (CRT) Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik (TVT)</p> <p>Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm Fakultät Energietechnik.Feinwerktechnik.Informationstechnik Fakultät Maschinenbau/Versorgungstechnik Fakultät Werkstofftechnik</p>	<p>TP1: Absorptionswärmepumpen auf Basis von Ionischen Flüssigkeiten (Prof. Dr. Wolfgang Arlt/FAU-TVT)</p> <p>TP2: Evaluierung verschiedener Konzepte zur Wärmetransformation (Prof. Dr. Peter Wasserscheid/FAU-CRT)</p> <p>TP3: Wärmepumpen auf Basis von Adsorptionssystemen (Prof. Dr. Wilhelm Schwieger/FAU-CRT)</p> <p>TP4: Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik (Prof. Dr. Arno Dentel/TH Nürnberg-MB/VS)</p> <p>TP5: Gebäudeintegration in zukünftige Energieversorgungssysteme (Prof. Dr. Günter Kießling/THN-EFI)</p> <p>TP6: Energieeffiziente Werkstoffe / Altbausanierung (Prof. Dr. Wolfgang Krcmar/THN-Werkstofftechnik)</p>

Projektbericht EnCN1

Im Forschungsbereich BUILDING II wird das Thema Energieeffizienz von Gebäuden fokussiert auf den Baukörper und die Versorgungssysteme im Gebäude angegangen.

Im Teilprojekt „Energieeffiziente Werkstoffe / Altbausanierung“ werden wärmetechnisch optimierte Bau- und Dämmstoffe entwickelt. Dabei beschäftigen sich die Aktivitäten nicht nur mit Massiv-Wandbaustoffen, sondern darüber hinaus auch mit Wärmedämmbeschichtungen und hochwärmedämmenden Mörtel-Produkten sowie Geopolymeren. Auf der Versorgungssystemseite werden neue Konzepte für Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen ebenso wie Adsorptionskältemaschinen entwickelt. Im Teilprojekt „Absorptionswärmepumpen auf Basis Ionischer Flüssigkeiten“ werden eine Vielzahl neuer Arbeitsmittelpaare untersucht und Ionische Lösungen (ILs) als alternative Lösungsmittel eingesetzt. Bei den „Wärmepumpen auf Basis von Adsorptionssystemen“ erfolgt die Entwicklung effizienter Wärmetransformationsprozesse auf Basis poröser Adsorbentien, insbesondere zeolithischer Materialien. Diese ermöglichen bisher ungenutzte Niedertemperaturabwärme oder auch Primärenergie aus Solarthermie als Antriebsenergie für die Erzeugung von Nutzkälte zu verwenden. Das Teilprojekt „Evaluierung verschiedener Konzepte zur Wärmetransformation“ beschäftigt sich mit der Energiebereitstellung für den LOHC-Prozess (Liquid Organic Hydrogen Carrier). Dabei werden Konzepte zur Verbesserung des Wirkungsgrads mit thermochemischen Wärmespeichern untersucht.

In einem interdisziplinären Forschungsvorhaben „Herzo Base – Energiespeicherhäuser“ (FKZ 03ET1364A) werden die von den Forschern erarbeiteten Erkenntnisse in einem gemeinsamen Vorhaben umgesetzt. Dabei erfolgt die Weiterentwicklung von Komponenten der Gebäudehülle und Gebäudetechnik sowie deren Systemintegration in Plusenergiehäuser. Neben der Demonstration von höchstwärmedämmenden Massivwandbaustoffen mit integrierter Wärmedämmung in der Gebäudehülle, werden im Bereich der Gebäude- und Elektrotechnik neue Konzepte zur Steuerung geothermischer Wärmepumpen mit elektrischen und thermischen Speichern in Kombination mit PV-Anlagen erarbeitet. Ziel ist die Senkung des Wärmebedarfs bei gleichzeitiger Steigerung der Energieeffizienz.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar
 Technische Hochschule Nürnberg
 Georg Simon Ohm



E-Mail
 Wolfgang.Krcmar@encn.de

Telefon
 +49 911 / 5880 1173

Web
 www.encn.de
<http://tinyurl.com/jckll8g>

1 Absorptionswärmepumpen auf Basis von Ionischen Flüssigkeiten (TP 1)

PROF. DR. W. ARLT, A. BAUMGÄRTNER UND DR. K. MÜLLER

1.1 Konzept und Arbeitsschwerpunkte

Die Entwicklung neuer Arbeitsmittelpaare für Absorptionskältemaschinen und Absorptionswärmepumpen steht im Zentrum dieses Forschungsprojektes. Die Kombination Kälte- und Lösungsmittel beeinflusst maßgeblich die Betriebspunkte der Anlage sowie die Güte des Prozesses. Als alternative Lösungsmittel werden Ionische Flüssigkeiten (ILs) untersucht. Mithilfe eines prädiktiven Modells (COSMO-RS) wird die Löslichkeit des Kältemittels in der IL vorhergesagt, ein sehr wichtiger Parameter für die technische Auslegung. Mit den so gewonnenen Ergebnissen kann eine Auswahl von Stoffpaarungen durchgeführt werden, die eine höhere Effizienz bei der Wärmenutzung erlauben.

1.2 Screening und Validierung des prädiktiven Vorgehens

Die Effizienz (COP, coefficient of performance) einer Absorptionswärmepumpe (AWP) wird wesentlich vom Phasengleichgewicht des Arbeitsstoffpaares bestimmt. ILs bieten eine nahezu unbegrenzte Auswahl an Arbeitsstoffen, deren Eigenschaften sich durch die Wahl der Ionen auf den jeweiligen Bedarf maßschneidern lassen. Da Messwerte für eine Vielzahl von Stoffpaarungen erstellt werden können, wurden Vorhersagemethoden eingesetzt. Die wichtigste in diesem Zusammenhang war das Modell COSMO-RS. Dieses sagt, ausgehend von der Molekülstruktur, mittels quantenchemischer Berechnungen das Phasenverhalten voraus. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden zehntausende ILs auf ihre Eignung als Arbeitsstoffe in AWP's überprüft und die besten Kandidaten der experimentellen Validierung zugeführt.

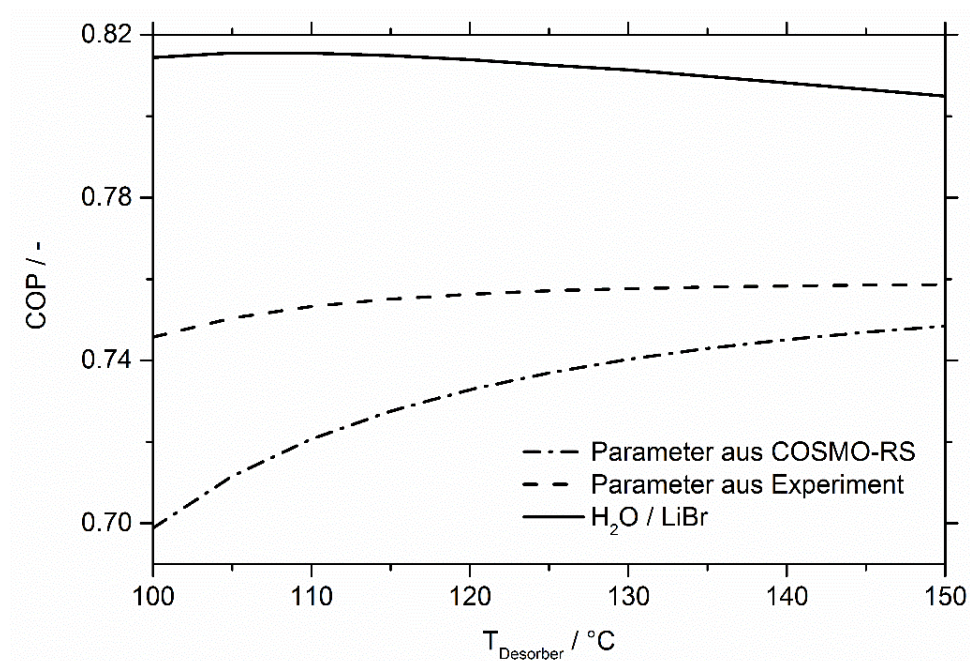


Abbildung 127: Vergleich des COPs in Abhängigkeit von der Desorbtemperatur für das Stoffpaar Wasser / EMIM EtSO₄ bei verschiedenen Ausgangsparametern (experimentell bzw. COSMO-RS abgeleitet) und im Vergleich zum Stoffpaar Wasser / LiBr

Zur Validierung des prädiktiven Ansatzes (a-priori Methoden und Gruppenbeitragsmethoden) wurden einige relevante Werte experimentell bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass die prädiktiv ermittelte Reihung der Kandidatensysteme sich experimentell bestätigen lässt.

In einigen Grenzfällen ergeben sich jedoch Diskrepanzen. Es zeigt sich aber, dass die Vorhersage eher zu pessimistisch war. Aus Abbildung 127 gehen Unterschiede im COP hervor. Die Abweichung liegt im Bereich von maximal 6 % bezüglich des COPs (bei 100 °C Desorbtemperatur) zwischen dem aus experimentellen Daten errechneten und dem mit prädiktiven Methoden (COSMO-RS und Gruppenbeitragsmethode) vorhergesagten COP. Diese Abweichung nimmt bei höheren Temperaturen ($T_{\text{Desorber}} > 115 ^\circ\text{C}$) ab. Die experimentellen Ergebnisse ergeben, wie das Beispiel in Abbildung 127 zeigt, größere COPs als die Vorhersage. Der tatsächliche COP liegt damit tendenziell über der Vorhersage.

Neben der Validierung wurde die Vorhersagemethodik für potentielle Stoffpaare auf die Absorptionswärmepumpe vom Typ I übertragen. Das Potential liegt in Stoffpaaren, deren Löslichkeit sehr hoch ist und deren Reinstoff- bzw. Mischungswärme­kapazität geringe Werte besitzen. Im Gegensatz zur Methodik bezüglich Wärmetransformatoren (Absorptionswärmepumpe Typ II) nimmt die Bedeutung der Wärmekapazität zu.

Für Absorptionswärmepumpen wurden die Stoffpaare Wasser / [EMIM][NO₃] für die Kältebereitstellung und Wasser / [EMIM][DMPO₂] für die Wärmetransformation als geeignet ermittelt. Die Stoffpaarungen besitzen nachfolgende, in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführte, Leistungszahlen. Der COP für die Kältebereitstellung mit dem konventionellen Stoffpaar Wasser / LiBr liegt bei 0,813. Der COP für die Wärmetransformation mit dem konventionellen Stoffpaar Wasser / LiBr liegt bei 0,485.

Tabelle 6: Leistungszahlen (COPs) für die Kältebereitstellung (Verdampfertemperatur: 15 °C, Absorptionstemperatur: 40 °C, Kondensationstemperatur: 45 °C, Desorptionstemperatur: 100 °C).

Stoffpaar	MMIM	EMIM	BMIM
Wasser/[Kation][NO ₃]	0,777	0,759	0,731
Wasser/[Kation][HSO ₄]	0,760	0,729	0,687

Tabelle 7: Leistungszahlen (COPs) für die Wärmebereitstellung (Kondensationstemperatur: 5 °C, Verdampfertemperatur und Desorptionstemperatur: 40 °C, Absorptionstemperatur: 55 °C).

Stoffpaar	MMIM	EMIM	BMIM
Wasser/[Kation][Acetat]	0,504	0,504	0,502
Wasser/[Kation][DMPO ₂]	0,509	0,510	0,510

Für die Absorptionswärmetransformation konnte damit eine Steigerung hinsichtlich der Leistungszahl gegenüber dem konventionellen Stoffpaar erzielt werden. Die Anlage mit der neuen Paarung wird größer ausfallen. Das Umlaufverhältnis (Verhältnis von Kältemittelmasse zu Gesamtmenge) ist unter den gegebenen Bedingungen der Wärmetransformation um 6 % größer als mit dem Stoffpaar Wasser / LiBr.

1.3 Erweiterung der Analyse über thermodynamische Charakteristika hinaus

Die Performance von Absorptionswärmepumpen hängt additiv zu den im vorigen Kapitel diskutierten thermophysikalischen Daten von der dynamischen Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit ab. Daher wurden beide Größen in die Untersuchungen mit einbezogen. Der Kürze wegen sollen sich die Ausführungen hier auf die Viskosität beschränken.

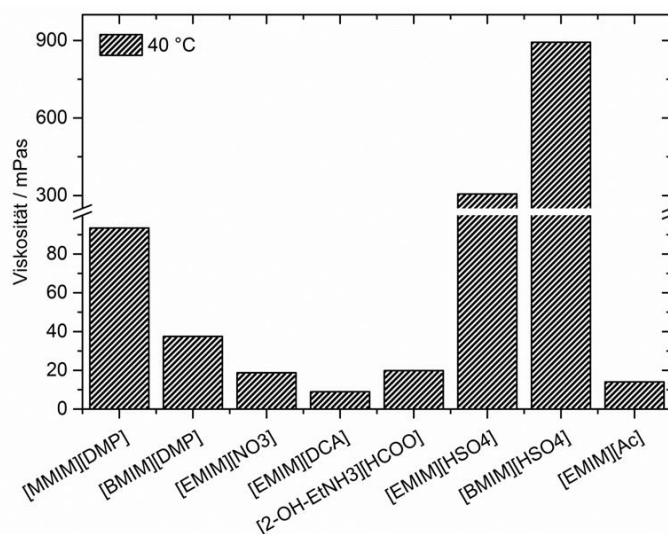


Abbildung 128: Viskositäten ausgewählter Ionischer Flüssigkeiten für den Einsatz in AWPs

Da Absorption und Desorption bei verschiedenen Mischungsverhältnissen von Wasser und IL erfolgen wurde der bisherige Forschungsstand um den Einfluss des Wassergehaltes und der Temperatur auf die Viskosität erweitert. Die dynamische Viskosität

der Wasser-IL-Mischungen ([EMIM][HSO₄], [BMIM][HSO₄] und [EMIM][Ac]) wurden in Abhängigkeit von Temperatur und Mischungsverhältnis bestimmt. Die Datenbasis wurde durch weitere experimentelle Messungen der ILs ergänzt. Für die untersuchten Mischungen wurde Newtonsches Verhalten beobachtet. Aus den Messungen gehen Auswahlvorschläge für ILs hervor, die niedrige Viskositäten und damit Potential für den Einsatz in Absorptionswärmepumpen aufweisen. Abbildung 128 gibt eine Übersicht über die dynamischen Viskositäten bei 40 °C (Absorptionstemperatur) wieder. Die Reihung gilt weitgehend unabhängig von der Temperatur.

Es konnte gezeigt werden, dass die dynamische Viskosität der Mischung stark konzentrationsabhängig ist ($\Delta\eta_{\text{Wasser-EMIM HSO}_4} = 985 \text{ mPa s}$). Im Betrieb der Absorptionskältemaschine sollten hochkonzentrierte, kältemittelarme Lösungen vermieden werden. Bei der Auswahl von ILs anhand ihrer Viskosität ist zu berücksichtigen, dass der Einfluss von Wasser bzw. des Kältemittels größer ist als der Einfluss der Temperatur. ILs mit hoher Löslichkeit für das Kältemittel (z.B. Wasser) sind daher zu bevorzugen.

1.4 Erreichtes Ziel

Infolge des Projektes ist es erstmalig möglich belastbare Aussagen über die Eignung von ILs in Absorptionswärmepumpen zu machen. Anders als konkurrierende Projekte blieben die Untersuchungen nicht auf Einzelaspekte wie dem Phasenverhalten beschränkt, sondern deckten alle relevanten Stoffparameter ab. Das beste Arbeitsstoffpaar hängt stark von der jeweiligen Anwendung ab. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass es mit ILs möglich ist die Performance der konventionellen Arbeitsstoffpaare in vielen Fällen zu übertreffen. Basierend auf den Ergebnissen des Unterprojektes steht dem Bau realer Systeme basierend auf ILs nichts mehr im Weg.

1.5 Ausblick: Neues Projekt zur Wärmeintegration in Gebäuden

Die Arbeiten zu Absorptionswärmepumpen zur Wärmenutzung in Gebäuden wurden durch ein weiteres Projekt ergänzt, in dem es darum ging, Potentiale zur Wärmeintegration in Gebäuden zu identifizieren. Dabei konnten große Potentiale vor allem unter Einbeziehung von thermischen Energiespeichern gefunden werden. Die Ergebnisse hierzu sind in eigenständigen Publikationen dargelegt.

2 Evaluierung verschiedener Konzepte zur Wärmetransformation (TP 2)

PROF. DR. P. WASSERSCHIED, J. ZEILINGER, M.SC. UND DR. A. BÖSMANN

2.1 Thermochemische Wärmespeicher zur Wärmeintegration in den LOHC Prozess

Im Rahmen des Teilprojekts „Evaluierung verschiedener Konzepte zur Wärmetransformation“ des EnCN-Projekts Building II wurden zwei verschiedene Lösungskonzepte zur Energiebereitstellung für den LOHC-Prozess (Liquid Organic Hydrogen Carrier) untersucht.

Ein Problem des LOHC-Prozesses liegt im Antrieb der Dehydrierungsreaktion, die während der energiearmen Zeit abläuft. Je nach LOHC liegt die Temperatur der Dehydrierung zwischen 230 °C und 350 °C und benötigt zwischen 50 – 75 kJ mol_{H₂}⁻¹. Die zur Beheizung des Dehydrierreaktors benötigte Wärme kann beispielsweise durch Verbrennung eines Teils des freigesetzten Wasserstoffes oder aus anderen externen Wärmequellen bereitgestellt werden. Um nun einen besseren Wirkungsgrad zu erzielen wurden zwei Arten thermochemischer Wärmespeicherung untersucht.

Zunächst wurden Komposite, bestehend aus hygroskopischen Salzen auf Aktivkohle hinsichtlich ihrer Wärmefreisetzung bei Kontakt mit Wasserdampf (z.B. aus der Abluft einer Brennstoffzelle) getestet. Es stellte sich heraus, dass diese Komposite sehr gut als Trocknungskartuschen verwendet werden können und Energie auf einem Temperaturniveau zur Beheizung eines Wohnhauses bereitstellen, aber für die Anwendung als Antrieb der Dehydrierung ungeeignet sind.

Im zweiten Lösungskonzept wurde ein Wärmespeicher erforscht, der auf Basis einer chemischen Reaktion arbeitet. Hierfür wurden zunächst mögliche Reaktionen theoretisch und anschließend praktisch untersucht.

Das Ziel bestand darin, den Wirkungsgrad des LOHC-Prozesses durch die Integration eines thermochemischen Wärmespeichers zu verbessern. Als Rahmenbedingungen wurden die LOHC spezifischen Temperaturen und Energiemengen festgelegt. Für die Dehydrierung des LOHC Perhydro-N-Ethylcarbazol werden rund 50 kJ mol_{H₂}⁻¹ bei einer Temperatur von 230 °C benötigt. Um Perhydro-Dibenzyltoluol zu dehydrieren müssen der Reaktion etwa 75 kJ mol_{H₂}⁻¹ auf einem Temperaturniveau von rund 350 °C

zugeführt werden. Gängiger Weise wird hierzu ein Teil des freigesetzten Wasserstoffes in einem Porenbrenner verbrannt, um die benötigte Wärme zu erzeugen. Durch die Integration eines Wärmespeichers können der Porenbrenner und der Wasserstoffstrom eingespart werden, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad verbessert. In der Brennstoffzelle wird der Wasserstoff zusammen mit Luft zu Strom und Wasser umgesetzt. Die Energie des Wassers soll unter Zuhilfenahme von thermischen Wärmespeichern auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden. In diesem Projekt wurde ein Adsorptionswärmespeicher und ein Metall/Metalloxid Wasserstoff- und Wärmespeicher untersucht.

Für den Betrieb des Adsorptionswärmespeichers wurde Aktivkohle mit unterschiedlichen hygroskopischen Salzen beschichtet und anschließend in einer Sorptionsanlage getestet. Diese Sorptionsanlage wurde im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt, aufgebaut und charakterisiert. In einer weiteren Masterarbeit wurden diverse Komposite evaluiert. Während der Messung wurde die aufgenommene Wassermenge detektiert sowie an mehreren Stellen die Temperatur gemessen und daraus die resultierende Wärmemenge bilanziert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 129 illustriert.

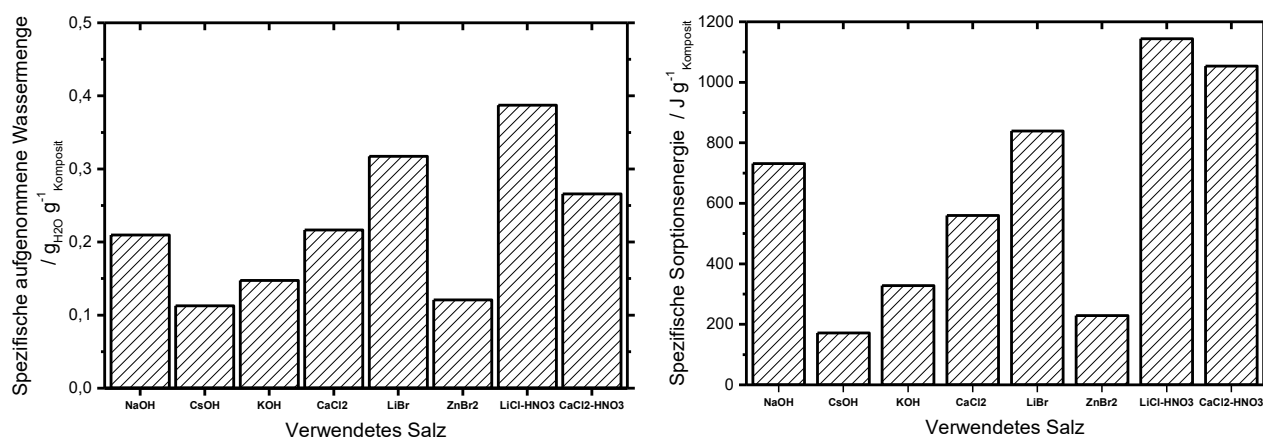
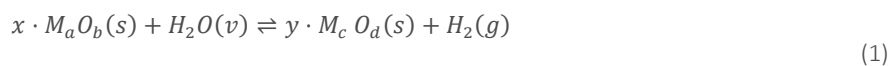


Abbildung 129: Links: Aufgenommene Wassermenge pro Gramm Komposit; Rechts: Resultierende Wärmemengen aus Wärmebilanz

Die Experimente zeigten, dass die Komposite bei gleichem Porenfüllgrad unterschiedliche Wassermengen aufnehmen können und entsprechend unterschiedlich hohe Wärmemengen abgeben können (s. Abbildung 129). Dies liegt einerseits an den verschiedenen gravimetrischen Beladungen, die je nach Salz zwischen 15 und 25 Gewichtsprozent variieren, aber auch an den Salzen selbst, die molar betrachtet unterschiedlich viel Wasser anlagern können. Der Komposit mit LiCl nimmt bei einer Sorptionstemperatur von 60 °C mit rund $0,4 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ g}_{\text{Komposit}}^{-1}$ am meisten Wasser auf und setzt währenddessen knapp 1150 J g^{-1} Wärmeenergie frei. Dieser Komposit wurde anschließend bei Temperaturen bis 230 °C auf seine Wasseraufnahmekapazität und der Wärmefreisetzung untersucht. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das Gleichgewicht stark in Richtung Desorption. Mit Hilfe dieser Messungen zeigte sich, dass diese Komposite zur Wärmefreisetzung bei Temperaturen größer als 100 °C nicht in Frage kommen. Allerdings eignen sich die hergestellten Komposite sehr gut zur Gastrocknung bspw. um den feuchten Wasserstoffstrom aus dem Elektrolyseur zu entwässern. Als Fallbeispiel wird folgendes Szenario angenommen: Ein Elektrolyseur produziert bei 70 bar $1 \text{ kg}_{\text{H}_2} \text{ h}^{-1}$ mit einem Taupunkt von 60 °C. Um diesen Wasserstoffstrom 24 h lang auf einen Wassergehalt kleiner als 10 ppm zu trocknen werden pro Tag rund 7,8 kg Komposit benötigt. Durch den Betrieb von zwei Kartuschen im Wechsel kann eine der beiden Trocknungseinheiten im Wechsel durch die Exothermie der Hydrierungsreaktion regeneriert werden, während die Andere gerade Wasser aufnimmt.

Wie oben erwähnt eignen sich die hergestellten Kompositenschüttungen nicht, um auf einem hohen Temperaturniveau Energie für die Dehydrierung eines LOHCs bereitzustellen. Somit wurden weitere Reaktionen in Betracht gezogen, die bei hohen Temperaturen mit Wasser exotherm verlaufen und vollständig reversibel sind. Eine mögliche Reaktion ist die Oxidation von Metallen mit Wasser als Oxidationsmittel. Als Nebenprodukt entsteht gemäß der nachfolgenden Reaktion Wasserstoff und das korrespondierende Metalloxid.

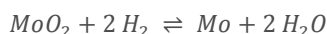
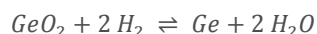
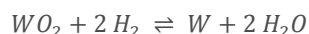
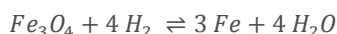


Mit $x = c \cdot (a \cdot d - b \cdot c)^{-1}$ und $y = a \cdot x \cdot c^{-1}$

In Kooperation mit Herrn Dipl.-Ing. Jonas Obermeier vom Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik wurden alle rational vertretbaren Elemente des Periodensystems hinsichtlich des oben beschriebenen Reaktionstyps untersucht. Als Rahmenbedingung wurden folgende Parameter festgelegt:

1. Die Oxidationsreaktion muss exotherm mit Wasser als Oxidationsmittel bei 450 °C ablaufen.
2. Die Reaktanten müssen fest sein und einen geringen Dampfdruck bei Reaktionsbedingungen aufweisen.
3. Die Oxidationsreaktion muss sich mit Wasserstoff bei 450 °C rezyklieren lassen.

Thermodynamisch betrachtet erfüllen lediglich die vier folgenden Reaktionen diese postulierten Anforderungen:



Diese Reaktionen wurden experimentell in einem XEMIS des Herstellers *Hiden Isochema* untersucht. Das XEMIS ist eine hochpräzise Mikrobalkenwaage. Die Massenänderung und damit der Umsatz der Probe kann in einem Temperaturbereich zwischen -150 – 500 °C gemessen werden. In der folgenden Abbildung 130 sind exemplarisch zwei Ergebnisse für den Massenverlauf von Eisenoxid und Wolframoxid in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Beide Oxide können über fünf Zyklen hinweg mit Wasserstoff reduziert und anschließend mit einem Heliumstrom, der bei 25 °C mit Wasser gesättigt wurde, oxidiert werden.

Für eine genauere Betrachtung und Diskussion sind die Zyklen unterteilt nach Reduktion (oben) und Oxidation (unten) für Eisen (links) und Wolfram (rechts) in der Abbildung 131 dargestellt.

Als Ausgangsstoff wurde jeweils das Metalloxid in der höchsten Oxidationsstufe verwendet. In der Abbildung 130 links sind alle fünf Reduktionszyklen auf die Startmasse von Fe_2O_3 normiert und gegen die Zeit aufgetragen. Der Verlauf der ersten Reduktion kann in drei Phasen unterschiedlicher Reaktionsgeschwindigkeiten aufgeteilt werden. Zunächst wird Eisen(III)oxid zu Eisen(II,III)oxid reduziert. Diese Reduktion benötigt nur wenige Sekunden, bis ein Plateau bei Fe_3O_4 erreicht wird. Die konsekutive Reduktion zu Eisen(II)oxid zeigt eine geringere Steigung, was für eine geringere Umsetzungsrate spricht. Wird der formale Umsatz zu FeO durchschritten, sinkt die normierte Masse wieder schneller bis nach etwa 15 Minuten die komplette Probe reduziert vorliegt. Die anschließenden Reduktionen starten in Abhängigkeit der vorangegangenen Oxidationen bei unterschiedlichen normierten Massen. Das normierte Massensignal nimmt nach einer kurzen Induktionsphase bei allen weiteren Reduktionen kontinuierlich ab. Diese Induktionsphase wird vermutlich durch eine initiale Adsorption von Wasserstoff auf der Oberfläche hervorgerufen.

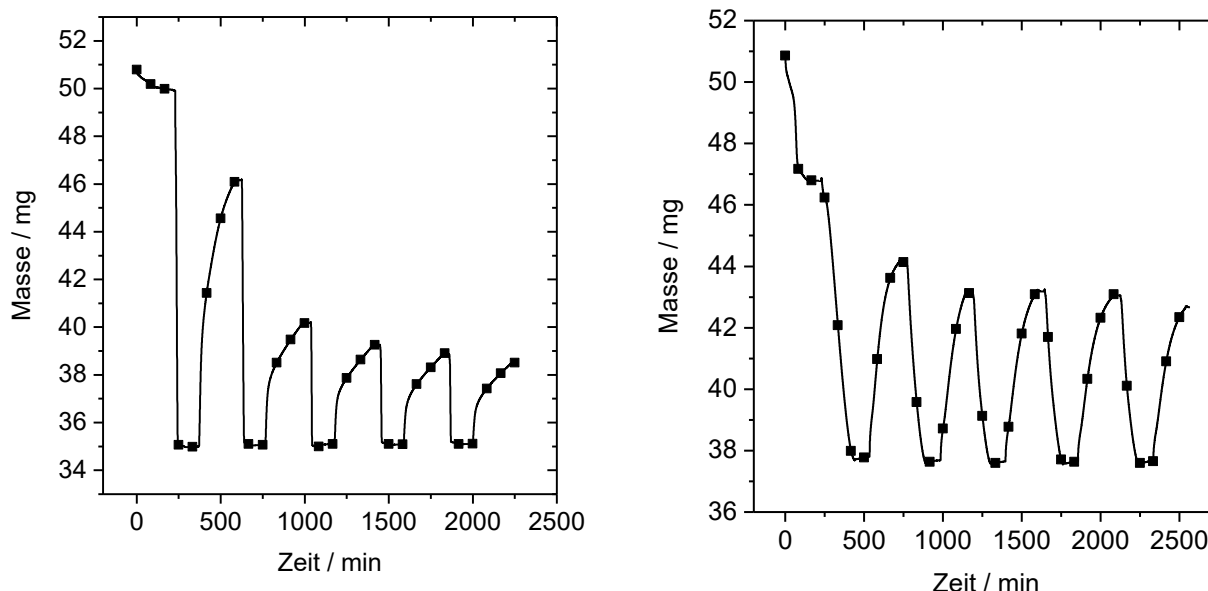


Abbildung 130: Zeitlicher Verlauf der Oxidation und Reduktion von Eisen (links) und Wolfram (rechts).
 $T = 450 \text{ °C}$; $P = 1 \text{ bar}$; $T_{\text{Sättiger}} = 25 \text{ °C}$; $\dot{V} = 150 \text{ Nml min}^{-1}$; Reduktionsgas = Wasserstoff; Oxidationsträgergas = Helium;
 Oxidationsmittel = Wasser.

Die Oxidationen sind ebenfalls auf die Startmasse normiert. Initial steigt die Masse bei allen Oxidationszyklen sehr stark an. Nach rund 10 Minuten flacht die Massenzunahme ab und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an, der bei der Oxidation von Eisen mit Wasser thermodynamisch maximal bei Eisen(II,III)oxid liegt. In einem Langzeitversuch wurde dies gezeigt. Das Abknicken des Graphs könnte durch das Einstellen eines thermodynamischen Gleichgewichtes während der Oxidation erklärt werden.

Durch die Oxidation bildet sich in der Pore Wasserstoff aus dem Wasser. Wird der Wasserstoff nicht schnell genug aus der Pore transportiert, stellt sich ein Gleichgewicht ein, das den Fortschritt der Reaktion inhibiert. Der flache Anstieg der Masse wäre dann nur durch Diffusion kontrolliert. Die Oxidationsversuche wurden mit einem Abbruchkriterium gestoppt, wenn die Massenzunahme geringer als $5 \mu\text{g min}^{-1}$ betrug. Die Massenzunahme während der Oxidations-Zyklen nimmt mit steigender Anzahl an Zyklen ab. Dies kann durch das Sintern des Eisens erklärt werden, somit steht weniger Oberfläche zur Verfügung und ist für die gasförmigen Reaktanten nicht mehr erreichbar.

Auf der rechten Seite der Abbildung 131 sind die normierten Zyklen für Wolfram dargestellt. Bei der Reduktion (oben) fällt auf, dass die Massenabnahme während aller fünf Zyklen nicht hoch genug ausfällt, um rechnerisch elementares Wolfram zu erhalten. Dies kann durch Verunreinigungen in der Probe erklärt werden. Im Gegensatz zu den Messungen mit Eisen nimmt der Umsatz der Oxidation in Abhängigkeit der Zyklen nicht so stark ab, was auf geringeres Sinterverhalten hindeutet. Unter Zuhilfenahme von Stickstoffsorptionsmessungen und REM-Aufnahmen konnte dieser Sachverhalt gezeigt werden.

Durch die Forschungsergebnisse konnte gezeigt werden, dass es möglich ist mit den getesteten Salz-Aktivkohle Kompositen große Gasströme einfach und effizient zu entfeuchten. Mit Hilfe der Metall-Metalloxid Reaktion besteht die Möglichkeit auf einem hohen Temperaturniveau ausreichend Energie bereitzustellen, um den LOHC-Prozess effizienter zu gestalten. Weiterhin entsteht bei der Oxidation zusätzlicher Wasserstoff, der einer Brennstoffzelle zugeführt werden kann, um somit den gesamten Wirkungsgrad weiter zu steigern. Weiterführend muss an diesem Punkt die Langzeitstabilität der Oxide untersucht werden bevor eine abschließende Bewertung vorgenommen werden kann.

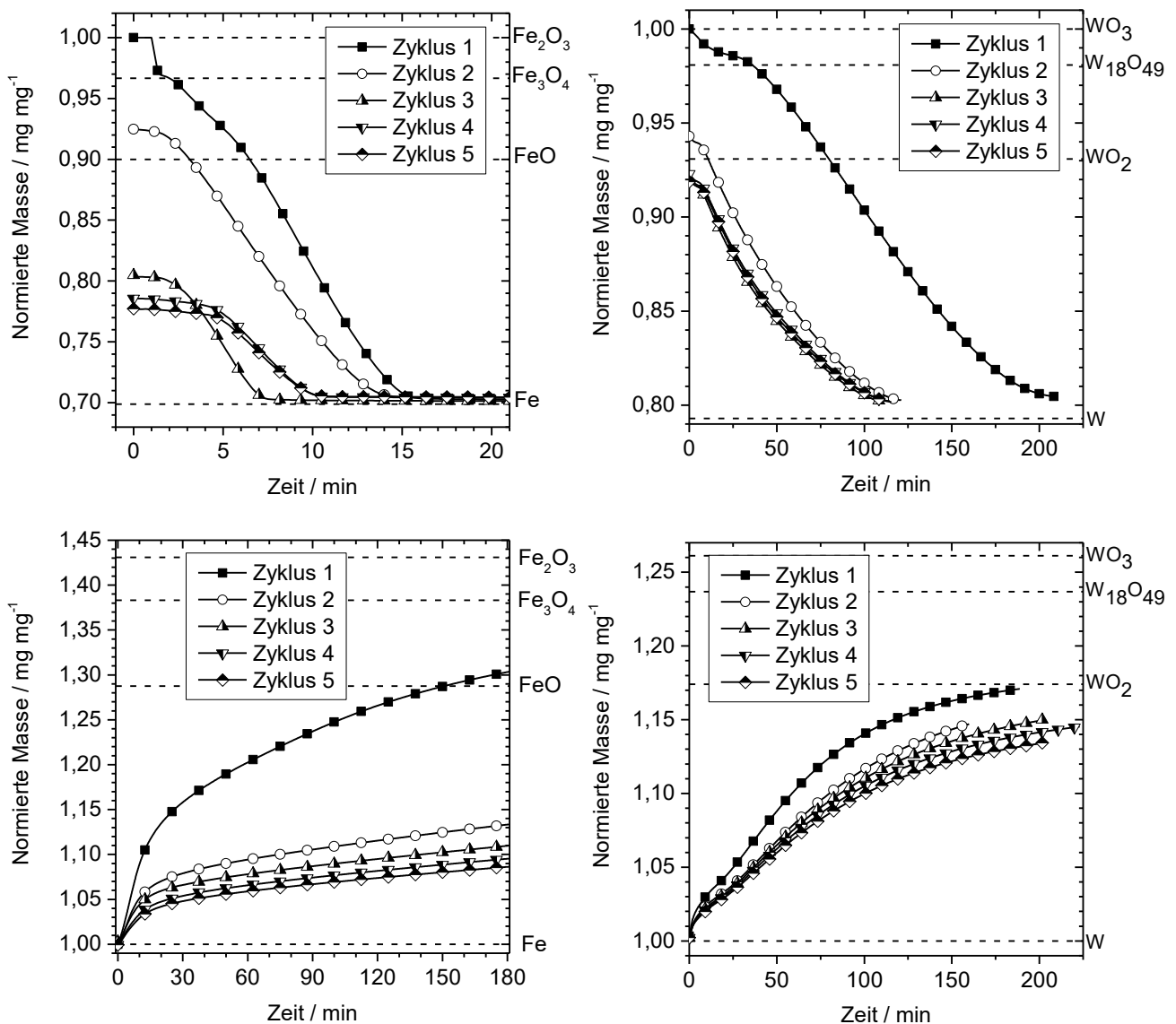


Abbildung 131: Normierte Masse gegen die Reaktionslaufzeit bei Reduktion (oben) und Oxidation (unten) für Eisen (links) und Wolfram (rechts). $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 1 \text{ bar}$; $T_{\text{Sättiger}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{V} = 150 \text{ Nml min}^{-1}$; Reduktionsgas = Wasserstoff; Oxidationsträgergas = Helium; Oxidationsmittel = Wasser.

3 Wärmepumpen auf Basis von Adsorptionssystemen (TP 3)

PROF. DR. W. SCHWIEGER UND M. HINZE, M.SC.

Im Mittelpunkt der Forschung steht in diesem Teilbereich die Entwicklung effizienter Verbundsysteme für Wärmetransformationsprozesse auf Basis poröser Adsorbentien. Diese bieten die Möglichkeit bisher ungenutzte Niedertemperaturabwärme oder auch Primärenergie aus Solarthermie als Antriebsenergie für die Erzeugung von Nutzkälte zu verwenden. Konventionell eingesetzte, elektrisch angetriebene Kompressionskälteanlagen führen dagegen gerade in den Sommermonaten zu Lastspitzen im Stromnetz. Da im Bereich der Gebäudeklimatisierung ein Temperaturniveau von 5-15 °C ausreichend ist, bietet sich die Verwendung von Wasser, welches sich durch eine hohe Verdampfungsenthalpie und biologische Unbedenklichkeit auszeichnet, als Kältemittel an. Auf Grund hoher Adsorptionskapazitäten gegenüber dem gewählten Kältemittel haben sich zeolithische Materialien, insbesondere aus der Familie der Siliziumaluminiumphosphate (SAPOs), als vielversprechende Adsorbentien herausgestellt.

Die Effizienz einer Adsorptionskälteanlage lässt sich durch den sogenannten *coefficient of Performance* (COP) beschreiben. Er ist definiert als

$$\text{COP} = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{Antriebsenergie}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der COP bildet eine Kennzahl, die die Effizienz einer gesamten Anlage aus rein thermodynamischer Sicht betrachtet. Um eine höhere Effizienz zu erzielen wurde während der Projektlaufzeit eine systematische Beurteilung verschiedener Adsorbentien aus der Familie der Siliziumaluminiumphosphate (SAPOs) durchgeführt. Unter festgelegten Anwendungsbedingungen hat sich vor allem der SAPO-18 als besonders geeignet herausgestellt. Dieser zeichnet sich durch einen hohen Sorptionshub im Vergleich zum oft verwendeten Kieselgel im angestrebten Arbeitsbereich (vgl. Abbildung 132), sowie einer guten hydrothermalen Stabilität in wiederholten Ad- und Desorptionszyklen aus. Dabei stellt der Siliziumanteil im Kristallgitter eine wichtige Größe dar, weil dieser die Hydrophilie des Adsorbens entscheidend beeinflusst. Nach einer Optimierung der Synthesebedingungen im Hinblick auf die angestrebte Anwendung, wurde die Synthese einem systematischen Scale-up unterzogen und ausgehend von einem 45 mL Teflon-ausgekleideten Autoklaven erfolgreich in einen 2 L Edelstahl Autoklaven überführt. Dabei war das primäre Ziel eine ausreichende große Menge an Adsorbens herstellen zu können, wobei gleichzeitig der erste Schritt zur Überführung der Synthese in eine Pilotproduktion gemacht wurde.

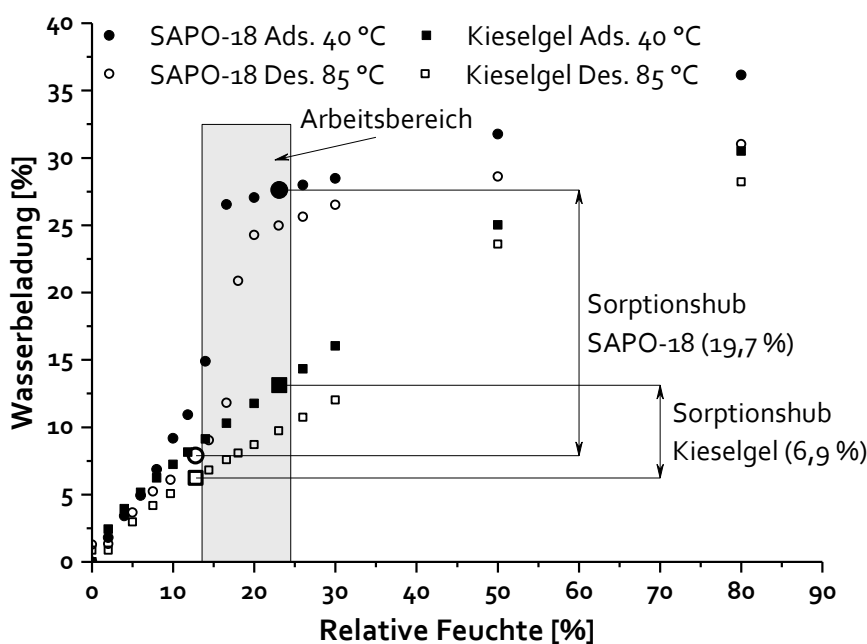


Abbildung 132: Vergleich der Wassersorptionsisothermen von SAPO-18 und Kieselgel

Als weitere Option zur Effizienzsteigerung wurden wärmeleitende Kunststoffe zur Verringerung der spezifischen Wärmekapazität der Wärmeübertrager als alternativer Werkstoff zu Metallen in Betracht gezogen. Durch eine geringere Wärmemenge, die zur

Temperaturerhöhung des Adsorbens im Desorptionsschritt benötigt wird, sinkt die Antriebsenergie und die Anlageneffizienz steigt.

Neben der rein thermodynamischen Betrachtung des Prozesses ist die Kinetik ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der spezifischen Kühlleistung eines Adsorbens. Die spezifische Kühlleistung eines Adsorbens wird dabei durch eine weitere Kennzahl, der SCP (*specific cooling power*) dargestellt:

$$SCP = \frac{\Delta h_{\text{verd.}} \cdot \Delta x}{t_c} \quad \text{Gleichung 2}$$

Der SCP definiert sich aus dem adsorbensspezifischen Sorptionshub (Δx), der Verdampfungsenthalpie des Kältemittels ($\Delta h_{\text{verd.}}$), sowie der benötigten Zykluszeit (t_c) zur Ad- und Desorption. Die Zykluszeit kann dabei über die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs des Adsorptionsschritts abgeschätzt werden. Sowohl die Ad- als auch die Desorptionskinetik kann dabei durch einen schlechten Wärme- oder Stofftransport limitiert werden.

Zur Gewinnung sorptionskinetischer Daten verschiedener Adsorberkonfigurationen und –konzepte wurde eine Versuchsanlage konzipiert, geplant und aufgebaut. Diese hat es ermöglicht das Potential wärmeleitfähiger Kunststoffe als Werkstoff zur Konstruktion von Wärmeübertragern dahingehend zu bewerten, ob eine Limitierung der Adsorptionskinetik durch den, verglichen mit Aluminium, höheren thermischen Widerstand beobachtet werden kann. In einem einfachen Versuchsaufbau wurde eine Monolage eines pelletierten Adsorbens auf unterschiedlich gefüllten Trägermaterialien untersucht. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Wasserdampfadsorption konnte gezeigt werden, dass bei dem gefüllten Polymer zwar eine gewisse Verlangsamung (kleines Δt) durch den erhöhten thermischen Widerstand gegenüber dem Aluminium eintritt, diese aber in einem tolerierbaren Rahmen liegt (s. Abbildung 133). Weiter ist gezeigt, dass die Verwendung von ungefülltem Kunststoff keine Option für die Konstruktion eines Wärmeübertragers ist, da die starke Verlangsamung der Wasserdampfadsorption die spezifische Kühlleistung zu sehr erniedrigen würde.

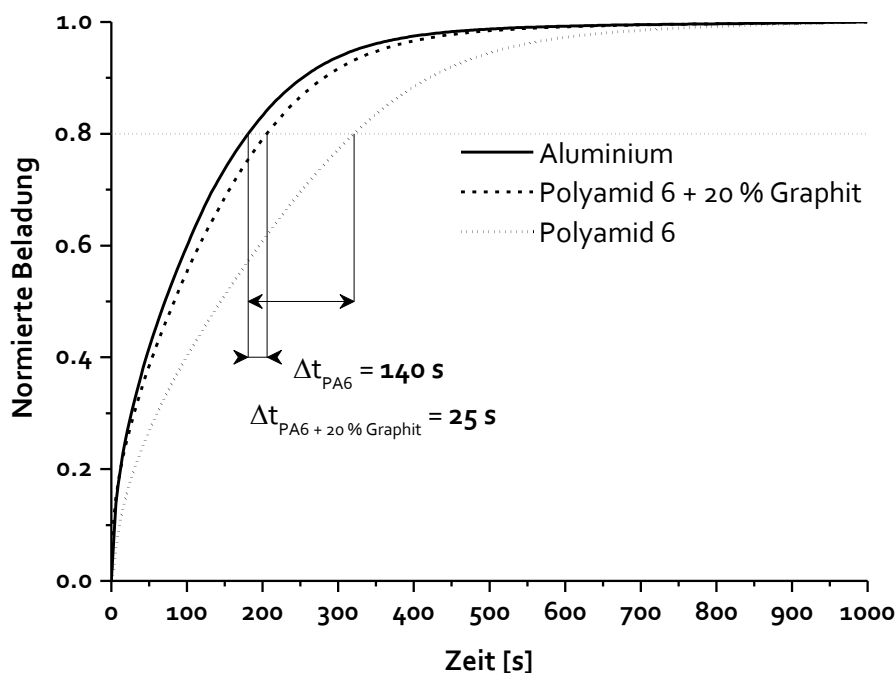


Abbildung 133: Zeitlicher Verlauf der Wasserdampfadsorption einer Monolage pelletiertem TAPSO-34 auf unterschiedlichen Trägermaterialien bei 40 °C.

Durch die bessere thermische Anbindung eines Adsorbens an den Träger im Fall einer Sprühbeschichtung, ist davon auszugehen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Trägermaterials hier einen größeren Einfluss auf die Adsorptionskinetik hat als bei einer Kugelschüttung. In Folge dessen sind bereits weitere Messungen zur Adsorptionskinetik von sprühbeschichteten Systemen mit optimierten, wärmeleitenden Polymeren erfolgt, die sich aktuell in der Auswertung befinden.

Aus den vielversprechenden Ergebnissen zur Verwendung wärmeleitender Kunststoffe und bereits gelaufenen Untersuchungen mit makroporösen Zeolith/Polymer-Kompositen ergeben sich aus Anwendungssicht weitere Möglichkeiten in der Entwicklung neuartiger Adsorberkonzepte, deren Betrachtung die nächsten Schritte bilden.

4 Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik (TP4)

PROF. DR. A. DENTEL, C. BETZOLD, M.ENG., S. BORDIN, M.SC., J. BUDERUS, M.ENG., K. KANDASAMY, M.SC. UND M. GARCIA PELAEZ, M.SC.

Zu den Forschungsschwerpunkten des Forschungsbereichs „Energieeffiziente Systeme der Gebäudetechnik“, Prof. Dr. Arno Dentel, gehören die rechnergestützte Optimierung von Gebäuden und Anlagen sowie die Entwicklung von Regel- und Betriebsführungsstrategien im Bereich der Gebäudetechnik. In 2013 wurde mit der Arbeitsgruppe am EnCN die Entwicklung von Konzepten für Gebäude und haustechnische Komponenten begonnen, die auf das volatile Stromangebot reagieren und dieses u.a. durch ein Lastmanagement zeitversetzt nutzen. Die Energiekonzepte befassen sich mit der optimierten Regelung (MPC) und Steuerung von Komponenten von Gebäuden und Plusenergiehäusern. Vor diesem Hintergrund werden die Forschungsprojekte „Herzo Base“, „i.Solar-Control“, „Smart City Demo“ und das EU-Projekt SENSIBLE (Horizon 2020) bearbeitet.

4.1 Solar Control



Abbildung 134: i.Solar Control Labordemonstrator am EnCN (©EnCN/Fuchs, links oben), eingebautes Energiesparfenster mit infra-rot-aktiver Beschattung im Real-Demonstrator (rechts), VICIONE Steuerung für das Energiesparfenster (links unten)

Im Rahmen der EU Gebäuderichtlinie 2010 für energieeffiziente Gebäude (European Energy Performance of Buildings Directive) sollen ab 2021 alle Neubauten als Niedrigstenergiehäuser („nearly zero-energy building“) errichtet werden. Für eine ausgeglichene Energiebilanz auf Gebäudeebene sind Wärmeschutz, lokale Energieproduktion und eine energieeffiziente Gebäudeklimatisierung unabdingbar. Die Basis hierfür bildet ein sparsamer Umgang mit Energie durch effiziente Komponenten, sowohl in Bezug auf die technischen Anlagen als auch auf die Gebäudehülle. Daneben wächst die Bedeutung der Integration von erneuerbaren Energien in die Versorgung von Gebäuden. Durch geeignete Regelstrategien, die das Gebäude als ganzheitliches System berücksichtigen, kann schließlich ein energieeffizientes Zusammenspiel aller Komponenten erreicht werden.

Eine entscheidende Komponente der Gebäudehülle stellt das Fenster dar. Im Rahmen des Projekts i.Solar Control wurde zusammen mit regionalen Projektpartnern aus Mittelstand und Forschung ein Prototyp eines energieeffizienten Fensters mit integriertem Verschattungssystem entwickelt und aktiv in die Gebäuderegulation eingebunden. Das Kernstück des Fensters bilden mehrere

selektiv beschichtete, textile Sonnenschutzbehänge. Mittels einer infrarot-aktiven Beschichtung wird Wärmestrahlung hauptsächlich reflektiert, während sichtbares Licht zu großen Teilen transmittiert wird. Dies ermöglicht unter anderem eine Reduzierung von solaren Gewinnen im Sommer bei gleichzeitiger Nutzung von Tageslicht. Durch eine variable Schaltung der Behänge kann ein flexibler, adaptiver Energiedurchlassgrad (g -Wert) erreicht werden.

Neben experimentellen Untersuchungen des Fensters im Laborversuch am Energie Campus Nürnberg (vgl. Abbildung 134) wurde parallel ein Modell für die Simulation erstellt, das die optischen Eigenschaften der Behänge beschreibt. Das Modell wurde in eine thermisch energetische Gebäudesimulation eingebunden, um den Einfluss des neuen Fensters auf die Gesamtenergiebilanz des Gebäudes zu analysieren. Hierbei stellte die Entwicklung einer geeigneten Strategie zur Steuerung des Sonnenschutzes einen zentralen Aspekt des Projekts dar. Mithilfe eines Raummodells wird die Behangkombination, die zu einem minimalen Energiebedarf führt, in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung und der Außentemperatur bestimmt. Die Funktion des Energiespar-Fensters wird seit Oktober 2016 im Rahmen eines Feldtests überprüft. Hierzu wurde das Fenster in ein Wohngebäude integriert, welches mit einer geothermischen Wärmepumpe ausgestattet ist, und die Regelstrategie in die Gebäudeautomation implementiert. Zusammenfassend ist das Hauptziel des Projekts eine Steigerung der Energieeffizienz bei gleichzeitiger Gewährleistung von thermischer und visueller Behaglichkeit durch die Integration eines adaptiven g -Werts in die Gebäuderegulierung.

4.2 EU Horizon 2020 Projekt SENSIBLE

Das in 2014 vorbereitete EU-Projekt SENSIBLE (Storage-Enabled Sustainable Energy for Buildings and Communities) ist zum November 2014 genehmigt worden. Das Projekt adressiert den Call LCE-08-2014 und hat das Ziel, elektro-chemische, elektro-mechanische und thermische Speichertechnologien in Verbindung mit erneuerbaren Energien in das Strom- und Energienetz sowie in Gebäude zu integrieren. Ein wichtiger Aspekt des Projektes ist die Frage, wie lokale Speicher mit dem Energiemarkt in einer Weise verknüpft werden können, um nachhaltige Geschäftsmodelle für den Einsatz von Speichersystemen, insbesondere in Gebäuden und Gemeinden, zu schaffen. Der Demonstrator in Nürnberg wird sich auf multimodale Energiespeicher in größeren Gebäuden konzentrieren. Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration von elektrischen und thermischen Speichern zusammen mit Wärmepumpen, BHKW und anderen Energieträgern.

4.3 Smart City Demo

PROJEKTTTEAM PROF. DR. A. DENTEL, PROF. DR. G. KIEßLING UND S. SCHÜßLBAUER

Das Projekt Smart City Demo legt den Fokus auf das Thema Energie im Rahmen der intelligenten Stadt. Hierbei sollen die Potenziale und der mögliche Nutzen von Kombinationen aus Heizsystemen, Solaranlagen und Speichersystemen evaluiert werden.

Dazu wurde in einem ersten Schritt ein thermisches Hausmodell in der Simulationsumgebung von Matlab/Simulink entwickelt. Dadurch ist es möglich, Energiebedarfe für ein Haus mit drei thermischen Zonen zu berechnen. Ebenso können die Innentemperaturen und deren Entwicklung im Zeitverlauf eines Jahres betrachtet werden. Trotz verschiedener Vereinfachungsverfahren zur Reduzierung der Komplexität der Systeme konnten im Vergleich mit Ergebnissen der Software TRNSYS sehr gute Resultate mit maximalen Abweichungen von weniger als $\pm 10\%$ erreicht werden. Die Heizung wird über einen einfachen PI-Regler umgesetzt, der die Innentemperatur des Wohnbereichs gemäß Norm DIN EN 12831 auf mindestens über $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hält. Als behaglich wird dabei eine Temperatur von $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm \Delta\theta$ bezeichnet. Strahlt die Sonne stark durch die Fenster, kann die Innentemperatur auch höher steigen. Somit wird der Einfluss von Außentemperatur und solarer Einstrahlung im Modell berücksichtigt. Durch die Freiheiten der Software können unterschiedliche weitere Regelungsstrategien entworfen werden.

Darauf folgend wurden elektrische Komponenten entwickelt. Mit ihnen ist es möglich ein elektrisches Versorgungsnetz von 110/20 kV bis zur 230V-Steckdose aufzubauen. Die Komponentenbibliothek besteht aus: Netzanschluss, Transformatoren, Lasten, Photovoltaikanlagen, Batterien, Leitungen und Knoten zur Spannungsmessung. Hiermit ist es möglich Spannungen an den Leitungen und Ströme in denselben zu bestimmen, sodass eine mitlaufende Lastflussrechnung möglich ist. Als Lasten werden generische Lastprofile verwendet und die Photovoltaikanlagen sind durch Vorabsimulation integriert. Der Speicher besitzt ein netzschonendes oder egoistisches Ladeverhalten, d. h. er lädt bei Überschuss, bei Bedarf entlädt er. Dieses Verhalten ist für jeden Haushalt individuell einstellbar. Last, PV und Speicher verfügen über verschiedene eigene einstellbare Parameter. Thermisch-elektrisch gekoppelte Systeme wie zum Beispiel Wärmepumpen sind ebenfalls verfügbar. Sie sind durch Angabe ihrer Arbeitszahl umgesetzt. Diese Komponenten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Raumtemperatur beeinflussen und gleichzeitig auch den elektrischen Verbrauch.

Im Moment besteht ein elektrisches Modell von Teilen Herzogenaurachs, genauer des Stadtteils Herzo Base. Modelliert ist der 110 kV-Netzanschluss im Umspannwerk in Burgstall, das 20 kV-Kabel zur Ortsnetzstation, verschiedene gewerbliche Verbraucher und das Neubaugebiet Herzo Base. Ebenso sind verschiedene Lasten privater Verbraucher und deren PV-Anlagen integriert.

Gegenwärtig wird die entwickelte Komponentenbibliothek genutzt, um verschiedene Szenarien bei der Versorgung eines Stadtviertels mit erneuerbaren Energien zu untersuchen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung der Ergebnisse aus Verbrauchersicht.

4.4 IEA HPT Annex 49: Design and integration of heat pumps for nZEB

Im Rahmen des Arbeitskreises Annex 49 wird an der Integration von Wärmepumpen in Nullenergiehäuser gearbeitet. Die Experten aus den passenden Projekten der Arbeitsgruppe werden in die Arbeitspakete Grundlagenarbeit, Systemintegration, Betriebsführung und Monitoring eingebracht. Neben Deutschland sind die Schweiz, Österreich, Norwegen, Schweden, Belgien und USA am Forschungsverbund beteiligt. Das Kick-off Meeting des Verbundes hat im Oktober 2016 am EnCN unter Leitung von Prof. Dr. Arno Dentel stattgefunden.

4.5 Kooperation mit EnCN Partnern

Raumklimastation: In Kooperation mit dem Fraunhofer Institut IIS (Herr Peter Heusinger) und dem Institut für Energie und Gebäude der Technischen Hochschule Nürnberg ist ein Algorithmus zur Schimmelüberwachung für Wohnräume in eine prototypische Anwendung überführt worden. Darauf aufbauend ist der Prototyp in das OGEMA Framework mittels einer Raumklima-App integriert worden.

4.6 Internationale Zusammenarbeit in der Nachwuchsförderung

In internationaler Zusammenarbeit mit einem französischen Studierenden (MINES ParisTech) ist eine Entwicklungsarbeit zu PV-T Kollektoren durchgeführt worden. Hierbei sind ein Simulationsmodell zur Beurteilung dynamischer Randbedingungen und eine Versuchsanlage im Labormaßstab entstanden. Ein spanischer Promotionsstudent (TU Madrid) hat im Rahmen eines Forschungsaufenthalts eine Arbeit zu intelligenten Fenstersystemen durchgeführt. Hierbei wurde ein Modell in TRNSYS entwickelt, um das Fenster simulativ und dynamisch abbilden zu können.

5 Herzo Base - Energiespeicherhäuser (TP 5)

PROF. DR. A. DENTEL, PROF. DR. G. KIEßLING, PROF. DR. W. KRCMAR, C. BETZOLD, M.ENG., K. KOUTROUVELI, M.SC., R. MIRMONTAZERI, M.SC. UND N. HESSE, M.SC.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Herzo Base – Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen“² erfolgt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aus drei Forschungsbereichen der Technischen Hochschule Nürnberg im EnCN. Ziel des Vorhabens ist die Erstellung eines Plusenergiehaus-Komplexes aus 8 Reihenhäuser-Einheiten durch Optimierung der passiven und aktiven Komponenten. Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Weiterentwicklung und Optimierung von Komponenten der Gebäudehülle und –technik sowie deren Systemintegration in Niedrigenergie-Reihenhäuser. In interdisziplinärer Zusammenarbeit wird die ganzheitliche Betrachtung der Reihenhäuser realisiert, indem die Werkstofftechnik, die Gebäudetechnik und Elektrotechnik ein fachübergreifendes Konzept entwickeln. Erzielt wird hierbei die Senkung des Wärmebedarfs bei gleichzeitiger Steigerung der Energieeffizienz. Neben der Demonstration von höchstwärmedämmenden Massivwandbaustoffen mit integrierter Wärmedämmung (Prof. Dr. Krcmar) in der Gebäudehülle, werden im Bereich der Gebäude- und Elektrotechnik (Prof. Dr. Dentel und Prof. Dr. Kießling) Konzepte zur Steuerung von geothermischen Wärmepumpen mit elektrischen und thermischen Speichern in Kombination mit Photovoltaikanlagen (PV) erarbeitet.

5.1 Baustoffe

Die Gebäudefassaden von 4 Häusern werden in einschaliger Bauweise mit Perlite-gefüllten Ziegeln entsprechend dem Stand der Technik erstellt. Bei 4 Vergleichshäusern erfolgt eine zweischalige Bauweise aus Perlit-gefüllten 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 $\lambda = 0,019 \text{ W/mK}$ auszeichnet, während Styropor bzw. Perlite nur eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ bzw. $\lambda = 0,040$ bis $0,060 \text{ W/mK}$ aufweisen (s. Abbildung 135). Abbildung 136 zeigt den Stand des Baufortschritts am 18.01.2017.

² Herzo Base – Energiespeicherhäuser – Ein energieflexibles Gebäude- und Energiekonzept von morgen, FKZ 03ET1364A



Abbildung 135: CALOSTAT-gefüllter WDF 12 Ausgleichsziegel (Links). Zweischalige Bauweise mit 30 cm dicken Perlit-gefüllten Mauerziegeln und einem 12 cm dicken CALOST-gefüllten WDF 12 Vorsatzziegel (Mitte)
Zweischalige Bauweise im Eckbereich des Erdgeschoss (Rechts)



Abbildung 136: Baufortschritt Herzo Base Energiespeicherhäuser am 18.01.2017

5.2 Gebäudetechnik: Angepasste Betriebsweise der modulierenden Wärmepumpen

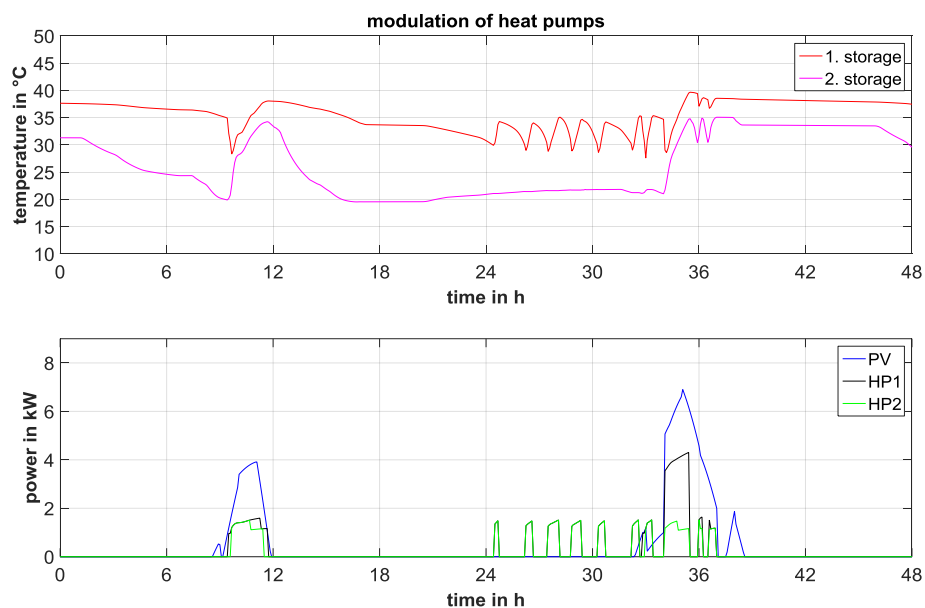


Abbildung 137: Angepasste Betriebsweise der Wärmepumpen (HP1 und HP2) an die PV-Produktion (PV)

Der wesentliche Schwerpunkt der Gebäudetechnik liegt auf der Entwicklung einer Betriebsführungsstrategie zur optimalen Be- und Entladung einer Pufferspeicherkaskade über modulierende Wärmepumpen in Abhängigkeit der PV-Produktion. Die zentrale Energieversorgung verfügt über zwei parallel geschaltete Wärmepumpen und zwei in Reihe geschaltete Pufferspeicher. Die Wärmepumpen können aufgrund der Modulation in ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Zudem kann der Betrieb der Wärmepumpen je nach erzeugter PV-Leistung stufenweise erhöht oder gesenkt werden, um eine möglichst hohe Eigennutzung

des PV-Stroms zu erreichen. Die Entwicklung der Betriebsführung der modulierenden Wärmepumpen wurde im Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS realisiert und getestet. Die Wärmepumpen werden nach PV-Produktionen in den Stufen 1 %, 50 % oder 100 % betrieben. Dabei wird der zweite Pufferspeicher, der als Überschussspeicher dient, zugeschaltet und bis 35 °C beladen. Ohne PV-Produktion werden die Wärmepumpen in ihrem besten Betriebspunkt bei 50 % betrieben und nur der erste Pufferspeicher wird beladen (s. Abbildung 137).

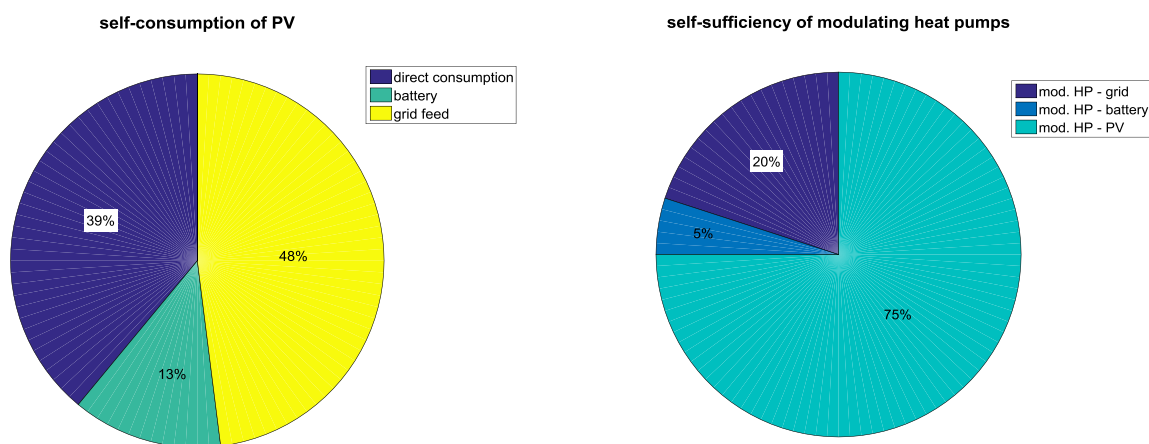


Abbildung 138: Eigenverbrauch der PV-Anlage und Autarkiegrad der modulierenden Wärmepumpen

Ziel der angepassten Betriebsweise der modulierenden Wärmepumpen ist eine Erhöhung des Eigenverbrauchs der PV-Produktion und eine Reduzierung des Netzbezuges. Der Eigenverbrauch des PV-Stroms liegt bei 52 %, wobei 39 % davon den Direktverbrauch im Haus und 13 % die Batteriebeladung abdecken. 48 % der PV-Produktion wird in das öffentliche Netz eingespeist. Aufgrund der angepassten Betriebsweise der modulierenden Wärmepumpen wird 75 % des Energieverbrauchs der modulierenden Wärmepumpen direkt mit PV-Strom und 5 % über die Batterie gedeckt. Nur 20 % des Energieverbrauchs wird aus dem Netz bezogen (s. Abbildung 138).

5.3 Elektrotechnik

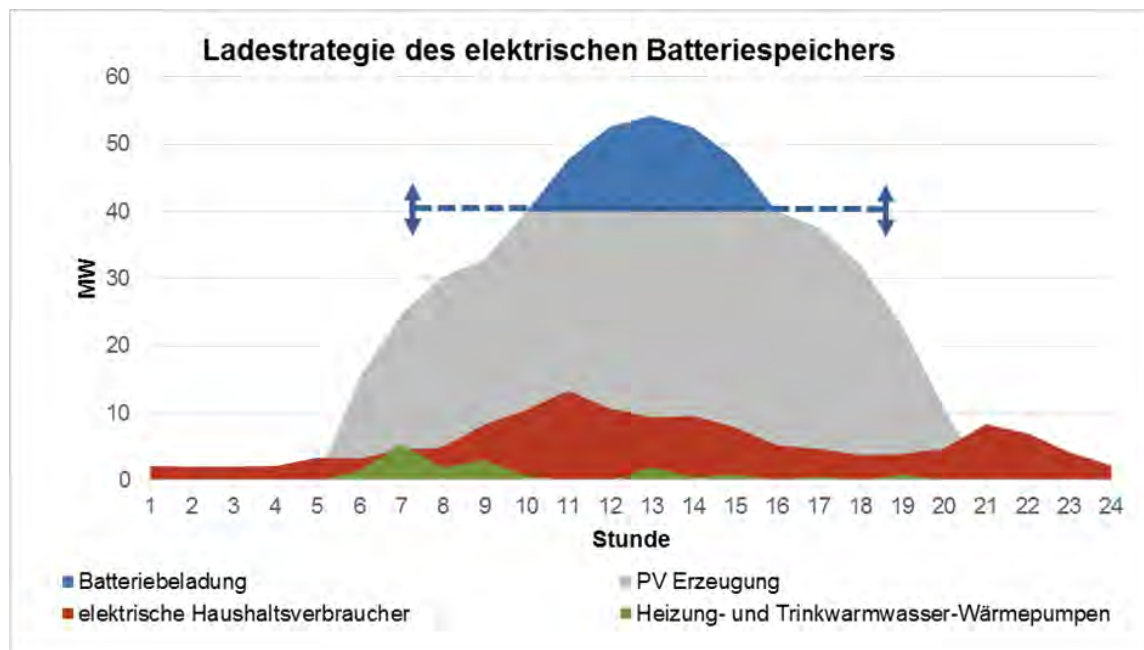


Abbildung 139: Prognosebasierte Betriebsstrategie des elektrischen Batteriespeichers mit dynamischer Einspeisebegrenzung (©TH-Nürnberg); Daten generiert mithilfe der Simulationssoftware MATLAB

Der Schwerpunkt der Elektrotechnik liegt bei der Entwicklung eines Konzeptes für das Monitoring aller elektrischen Verbraucher und Erzeuger. Die Installation und der Betrieb von Energiezählern für unterschiedliche Komponenten dienen der Überwachung und der Messung des Energieverbrauchs. Diese Daten sind notwendig, um die Betriebsstrategien dem persönlichen Lastprofil der

Bewohner anzupassen. Zusätzlich entwickelt die Elektrotechnik prognosebasierte Betriebsführungsstrategien für den elektrischen Batteriespeicher. Diese verfolgen das Ziel Kosten zu minimieren, den Energiedurchsatz und die Ausnutzung der Batterie über ihre Lebensdauer zu maximieren und den Leistungspreis für den Netzbezug durch Spitzenlastkappung zu verringern. Durch netzschonendes Laden werden auch Erzeugungsspitzen vermieden und ein Beitrag zur Netzstabilität geleistet. Somit wird, wie abgebildet für einen Beispieltag im Sommer, die Batterie bei Überschreitung einer minimalen Leistungsschwelle aufgeladen (s. Abbildung 139). Diese Schwelle variiert für jeden Tag, basierend auf Wetter- und Lastprognosen.

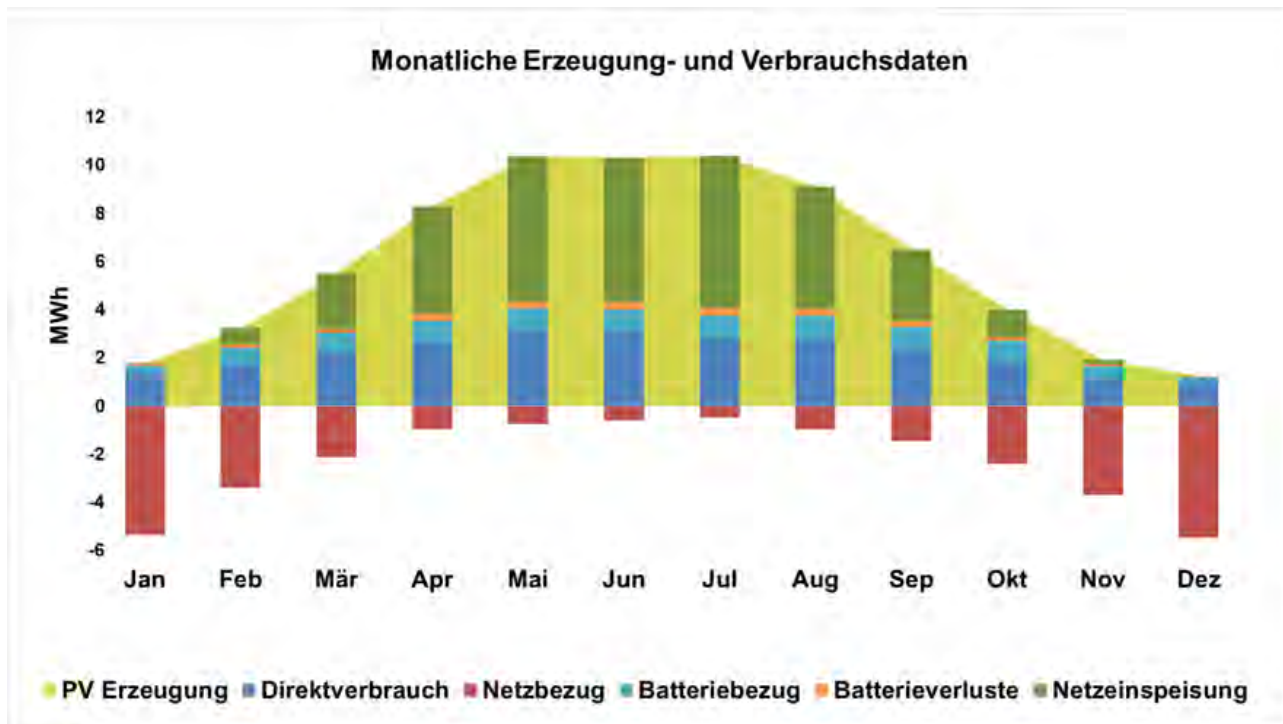


Abbildung 140: Monatliche Erzeugungs- und Verbrauchsdaten generiert mithilfe der Simulationsprogramme PV-SOL und MATLAB (©TH-Nürnberg)

Die Simulationsprogramme PV-Sol, Polysun und MATLAB werden zur Dimensionierung der PV-Anlage und des Batteriespeichers verwendet und ermöglichen die zeitlich aufgelöste Darstellung der Erzeugung und des Verbrauchs (s. Abbildung 140). Bei einer negativen Residuallast wird der PV-Strom nach Priorität verteilt: die höchste Priorität wird dem direkten Haushaltsstromverbrauch, die Zweite der Heizwärmepumpe, die Dritte den E-Autos und die Vierte dem Batteriespeicher zugeordnet. Der verbleibende Überschuss wird in das Netz eingespeist.

6 Energieeffiziente Werkstoffe/Altbausanierung (TP 6)

PROF. DR. W. KRCCMAR, N. HESSE, M.SC., S. SCHMIDT, M.ENG., E. KRÄNZLEIN, M.SC., C. ALLAR, M.ENG., N. WEDEL, M.ENG. UND J.P. MÜLLER

6.1 Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel

Vergleicht man die Wärmeleitfähigkeiten hochwärmedämmender Wandbaustoffe mit den entsprechenden Werten der verwendeten Mörtel- bzw. Dünnbettmörtel namhafter Baustoffhersteller, so geht hervor, dass die Mörtelfugen als Kältebrücken in einem Wandsystem fungieren. Das Ziel besteht darin, die Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel und darüber hinaus von Putzmörtel, bei gleichbleibender Druckfestigkeit, abzusenken. Basierend auf Stoffraumrechnungen erfolgte eine gezielte Substitution von Mörtelanteilen in der Ausgangsmischung durch ausgewählte Zusatzstoffe, die einzeln sowie in kombinierter Rezeptur beigegeben wurden. Aus einem durchgeführten Screening ging hervor, dass die puzzolanischen Zusätze – expandierter Perlit, expandiertes Vulkangestein der Sorte II und speziell die Kieselsäure, einen festigkeitssteigernden bzw. wärmedämmenden Effekt im Mörtelsystem bewirken (s. Abbildung 141).

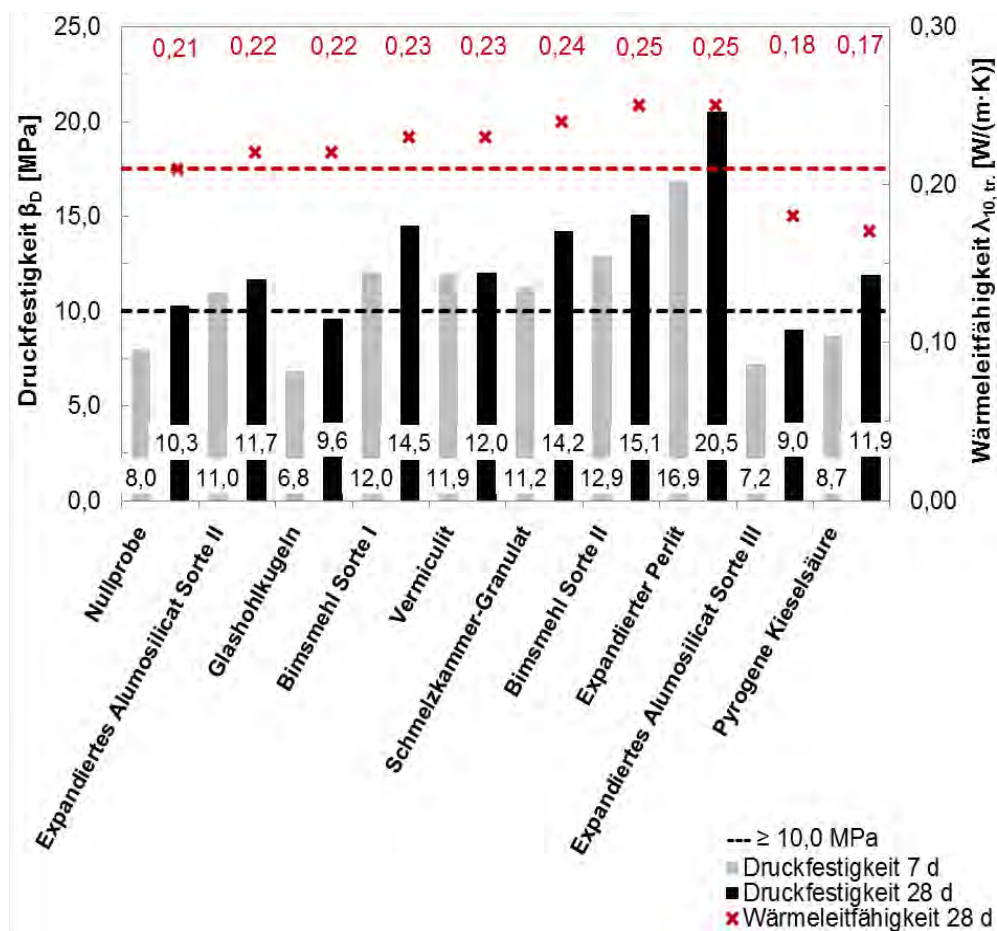


Abbildung 141: Korrelation von 28 d-Druckfestigkeiten und -Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff für Dünnbettmörtelproben

Würde ein industriell hergestellter Dünnbettmörtel künftig mit dem Zusatzstoff Kieselsäure hergestellt werden, so resultiert daraus eine vergleichsweise erhöhte Druckfestigkeit um 15,5 %, bei einer verbesserten Wärmeleitfähigkeit um 20 %, im Vergleich zur unbehandelten Mörtelprobe bzw. Nullprobe. Eine damit aufgebaute Gebäudewand würde sich somit durch eine verbesserte Wärmedämmung auszeichnen. Von Interesse ist zudem die Erhöhung der Festigkeit um 99 % durch die Zugabe von Perlit im Vergleich zur Nullprobe. In momentan laufenden Untersuchungen werden die beiden Zusatzstoffe miteinander kombiniert, sodass sich deren Effekte ergänzen und folglich das Mörtelsystem weiter verbessert werden kann.

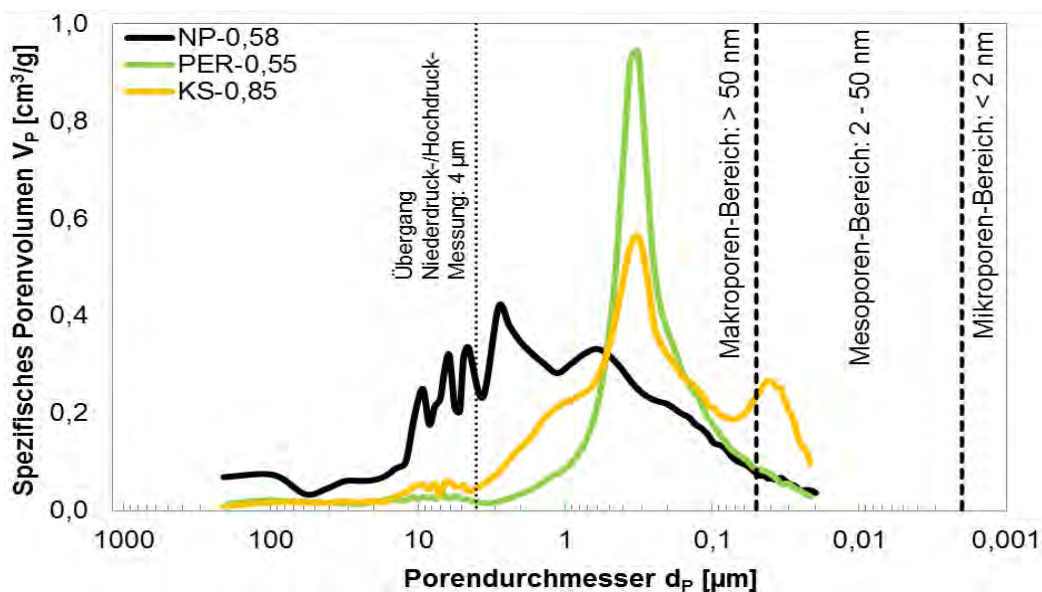


Abbildung 142: Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser für optimierte Mörtelmischungen

Um die Ergebnisse hinsichtlich der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit und der Druckfestigkeit aus Abbildung 141 genauer zu erklären, wurden von den optimierten Mörtelmischungen u. a. Quecksilberporosimetrie-Messungen nach einem Probenalter von 28 Tagen durchgeführt. In Abbildung 142 und Abbildung 143 ist diesbezüglich das spezifische bzw. kumulative Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser für die verwendeten Mörtelmischungen dargestellt. Ergänzend dazu sind in Tabelle 8 die dazugehörigen Messwerte eingetragen.

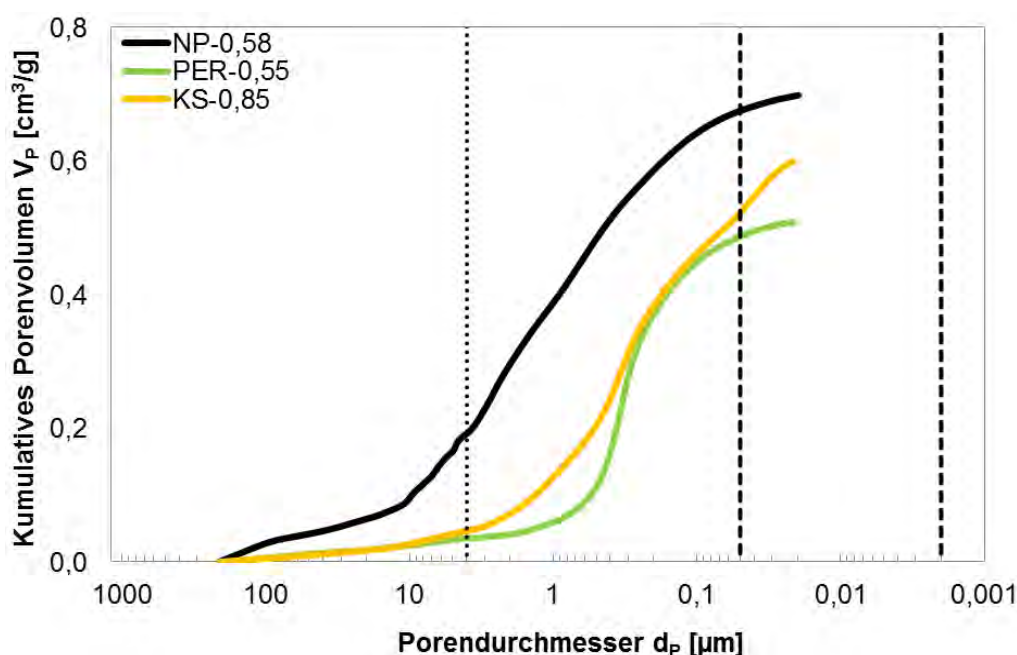


Abbildung 143: Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser für optimierte Mörtelmischungen

Tabelle 8: Werkstofftechnische Charakterisierung von Kieselsäure-, Perlite- und Vulkangestein-haltigen Dünnbettmörteln im Vergleich zur Nullprobe

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Masse-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Feststoffdichte ρ_F [g/cm ³]	Porengrößenbereich [µm]	Spezifisches Porenvolumen		Häufigster Porendurchmesser d_p [µm]	Mittlerer Porendurchmesser
					Anteilig V_q	Gesamt [cm ³ /g]		
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	2,08	210,00 - 4,00	0,191	0,70	2,73	1,36
				4,00 - 0,05	0,482			
				0,05 - 0,02	0,023			
Expandierter Perlit	10	0,57	2,06	190,00 - 4,00	0,035	0,51	0,34	0,32
				4,00 - 0,05	0,452			
				0,05 - 0,02	0,022			
Expandiertes Alumosilicat Sorte II	10	0,60	2,13	195,00 - 4,00	0,192	0,74	0,58	0,96
				4,00 - 0,05	0,530			
				0,05 - 0,02	0,022			
Pyrogene Kieselsäure	10	0,86	1,81	210,00 - 4,00	0,046	0,60	0,33	0,31
				4,00 - 0,05	0,476			
				0,05 - 0,02	0,079			

Aus Tabelle 8 wird ersichtlich, dass durch die Zugabe von Perlit das spezifische Porenvolumen von 0,70 cm³/g der Nullprobe auf 0,51 cm³/g abnimmt, folglich auch die Porosität. Die Mörtelmatrix kann somit als dichter und weniger porös betrachtet werden. Daraus resultiert die Festigkeitssteigerung um 99 %, aber auch eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 0,21 auf 0,25 W/(m·K)

im Vergleich zur Nullprobe. Im Falle der Kieselsäure lässt sich die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtelsystems, durch ein Porenwachstum um 244 % im Bereich der Mesoporen erklären. Vergleicht man die beiden Kurvenverläufe von Nullprobe und Kieselsäure in Abbildung 143 wird dies durch den steileren Kurvenanstieg der Kieselsäure-Probe ab 50 nm deutlich. Es ist davon auszugehen, dass eine feine Porenverteilung in einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit resultiert. Der festigkeitssteigernde Effekt der Kieselsäure und des Perlit wurde zudem in röntgenographischen Aufnahmen untersucht. Entsprechende Untersuchungen wurden auch an Putzmörteln durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr erfolgreich (auf eine Darstellung der Ergebnisse wurde verzichtet).

Ausblick:

Die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit war erfolgreich. Die Ergebnisse konnten auch auf einen Putzmörtel übertragen werden. Die Untersuchungen werden im Rahmen einer laufenden Dissertation noch erweitert. Ziel ist die marktreife Entwicklung wärmetechnisch verbesserter Mörtelprodukte im Rahmen eines neu zu beantragenden Forschungsvorhabens.

6.2 Substitution herkömmlicher Bindebaustoffe durch Geopolymere

Im Teilprojekt wird ein neuartiger Bindebaustoff auf der Basis von Geopolymeren entwickelt, der zur wärmedämmenden Verfüllung von Massivwandbaustoffen eingesetzt werden soll. Dabei sind eine möglichst niedrige Wärmeleitzahl und gleichzeitig eine möglichst hohe Druckfestigkeit die herausragenden Werkstoffeigenschaften. Mit den Geopolymeren sollen zementgebundene Bindebaustoffe (z.B. Beton) substituiert werden, für deren Herstellung große Mengen Zementklinker bei Temperaturen von 1450 °C gebrannt werden müssen. Die für den Klinkerbrand benötigten Primär- und Sekundärbrennstoffe setzen zusammen mit dem dissoziierenden Kalk riesige Mengen klimaschädliches CO₂ frei. Im Vergleich zur Zementherstellung benötigt das kalterhärtende Geopolymer-System im Idealfall keine thermische Prozessstufe, verbraucht keinen Primärbrennstoff und verursacht deshalb um 68 % weniger CO₂-Emissionen. Hierzu werden in der Arbeitsgruppe neue Geopolymer-Systeme auf der Basis von Metakaolin und von Flugasche erprobt. Die durchgeführten Forschungsarbeiten teilen sich dabei in 3 Produktklassen auf (Abbildung 144). Einerseits werden hochwärmedämmende Geopolymer-Schäume entwickelt, auf der anderen Seite sind Geopolymer-Baustoffe mit höchsten Druckfestigkeiten das Ziel. Durch Kombination beider Produktklassen wird der Bereich der Geopolymer-Leichtbetone erschlossen. Neben den bisher genannten Vorteilen der Geopolymere sind auch mechanische, thermische sowie ökologische und ökonomische Vorteile von Bedeutung.



Abbildung 144: Einteilung der Geopolymere in Produktklassen

Geopolymer-Schäume

In der Klasse der Geopolymer-Schäume wurde ein auf Metakaolin basierendes Leichtgeopolymer mit einer Rohdichte zwischen $\rho = 0,28 \text{ g/cm}^3$ bis $0,35 \text{ g/cm}^3$, einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,062 \text{ W/(mK)}$ und einer Druckfestigkeit von $\beta > 2 \text{ N/mm}^2$ entwickelt. Um einen großtechnischen Einsatz in Baustoffen zu ermöglichen, soll die Schaumentwicklung selbstständig, z.B. im inneren Lochmuster eines Hochlochziegels aufblähen. Um den plötzlichen Wasserentzug aus dem Geopolymer durch die saugende Ziegeloberfläche zu verhindern, wurde ein Hydrophobierungsmittel eingesetzt. Der expandierte aber noch weiche Schaum wird mittels Temperaturbehandlung bei 60 °C innerhalb von Minuten verfestigt. Die Prüfung der Äquiv. Wärmeleitfähigkeit nach EN 1946-2 ergab eine Minderung um 45,6 % im Vergleich zum unverfüllten Hochlochziegel. Die dabei erreichte Äquiv. Wärmeleitfähigkeit beträgt $0,118 \text{ W/(mK)}$.



Abbildung 145: Mit Geopolymer-Schaum verfüllte Hochlochziegel

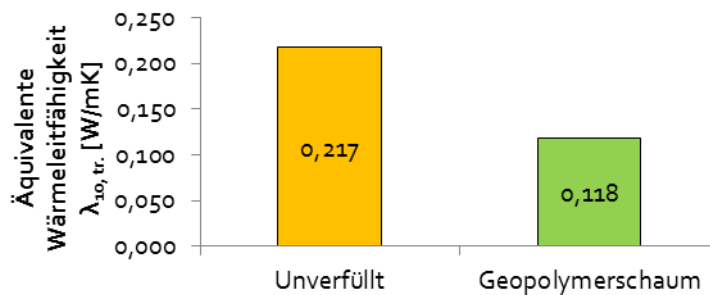


Abbildung 146: Minderung der Äquiv. Wärmeleitfähigkeit unverfüllter Hochlochziegel durch Verfüllung mit Geopolymer-Schaum

Geopolymer-Leichtbeton

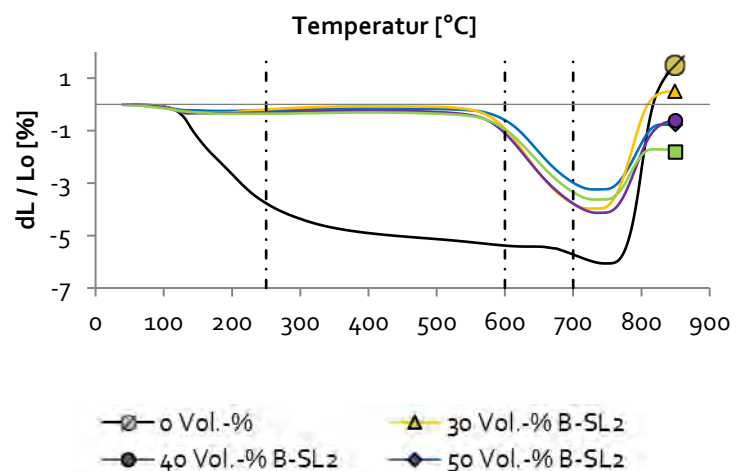
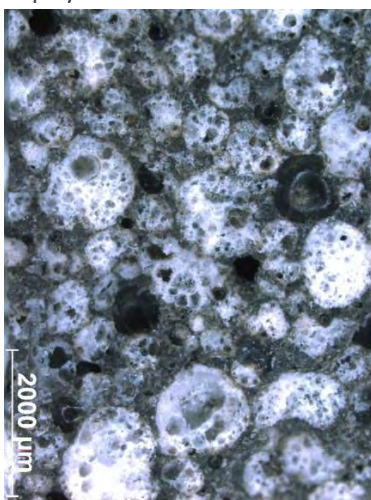


Abbildung 147: a) Mikroskopische Aufnahme einer Geopolymer-Leichtbeton-Probe (links).

b) Minderung der thermischen Schrumpfung von Geopolymer-Leichtbeton durch Erhöhung des Füllstoffanteils B-SL2 (rechts).

Ziel ist die Entwicklung eines Geopolymer-Leichtbetons mit einer Druckfestigkeit $\beta > 20 \text{ N/mm}^2$ und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.} < 0,25 \text{ W/(mK)}$. Zudem soll eine Temperaturstabilität von mind. $300 \text{ }^\circ\text{C}$ gewährleistet werden. Diese Ziele sollen durch Zusatz von Leichtfüllstoffen in eine geeignete Geopolymer-Matrix erreicht werden. Hierzu wurden einer Flugasche-Geopolymer-Matrix jeweils steigende Volumenzugaben (30, 40, 50, 60 Vol.-%) Blähglasgranulat mit einer speziellen Sieblinie, mit abgetrenntem Kleinstkorn $d > 0,5 \text{ mm}$ zugemischt und die thermischen und mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Geopolymere ermittelt (s. Abbildung 146). Durch den Einsatz von Blähglas wird die thermische Schrumpfung im Vergleich zur Nullprobe massiv reduziert (s. Abbildung 147: b) und gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ auf Kosten der Druckfestigkeit gemindert. Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.} = 0,249 \text{ W/(mK)}$ wurde durch Zugabe von 60 Vol.-% Blähglasgranulat (B-SL2) erzielt, bei einer Druckfestigkeit von $\beta = 21,7 \text{ N/mm}^2$.

Hochfeste Geopolymere

Bei den hochfesten Geopolymeren sind hohe Druckfestigkeiten über 70 N/mm^2 bei gleichzeitig hoher thermischer Beständigkeit über $800 \text{ }^\circ\text{C}$ von besonderem Interesse. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden einer Flugasche-Geopolymer-Matrix jeweils stei-

gende Volumenzugaben (30, 40, 50, 60 Vol.-%) Quarzsand als kristalliner Zuschlag zudosiert. Dabei zeigte sich bei den ausgehärteten Geopolymeren eine stetige Erhöhung der Biegezugfestigkeit, des dyn. Elastizitätsmoduls und der Wärmeleitfähigkeit (s. Abbildung 148 und Abbildung 149). Die Druckfestigkeit fällt zunächst ab und nimmt erst bei einer Quarzsand-Dosierung von über 50 Vol.-% zu. Die höchste Druckfestigkeit wird mit $\beta = 74,9 \text{ N/mm}^2$ bei einer Biegezugfestigkeit von $6,5 \text{ N/mm}^2$ und einem E-Modul von $26,9 \text{ GPa}$ erreicht. Bedingt durch die Kristallinität des Quarzsandes steigt auch die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,44 \text{ W/(mK)}$ auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 1,1 \text{ W/(mK)}$. In Kombination mit dem hervorragenden Temperaturverhalten, bei dem sich keine strukturverändernden Prozesse bis $820 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigen, ergeben sich für dieses Material deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Bindestoffen.

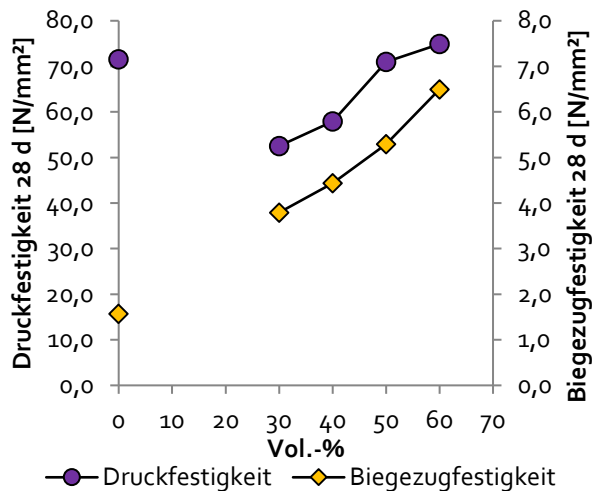


Abbildung 148: Einfluss steigender Quarzsand-Zugaben auf die Druck- und Biegezugfestigkeiten hochfester Geopolymere

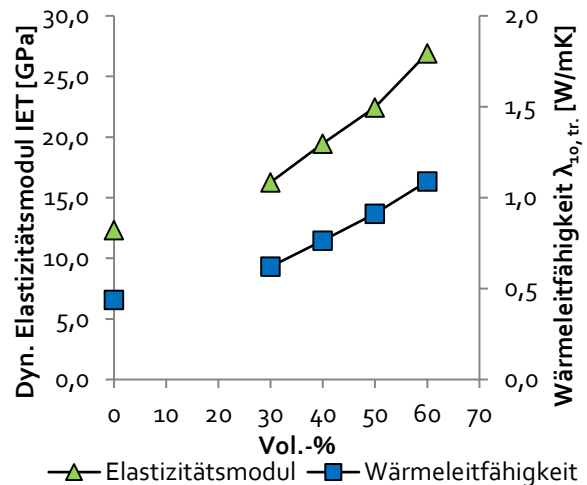


Abbildung 149: Einfluss steigender Quarzsand-Zugaben auf E-Modul und Wärmeleitfähigkeit hochfester Geopolymere

Ausblick zur Weiterentwicklung der Geopolymere:

Im nächsten Schritt werden geeignete Demonstratoren hergestellt. Nach der Kontaktaufnahme mit interessierten Firmen aus der Baustoffindustrie ist die Beantragung eines Forschungsvorhabens geplant, mit dem Ziel, Produkte aus Geopolymeren für den Baustoffmarkt zu entwickeln.

Ausblick zur Weiterentwicklung der Innenbeschichtung für hochwärmedämmende Ziegel:

Im Rahmen der Arbeiten im EnCN 2 ist die Weiterentwicklung der Ziegel-Innenbeschichtung bis zur Marktreife geplant. Für die Anschubfinanzierung und Koordinierung der Zulassungsprüfungen wurde ein Konsortium, bestehend aus 17 Mauerziegelwerken, gegründet. Die dazu notwendige Beschichtungsmaschine befindet sich bereits im Energie Campus. Im Rahmen der Aktivitäten ist die Beantragung eines größeren Forschungsvorhabens geplant.

Ausblick zur Weiterentwicklung eines Wirbelschicht-Reaktor-Prototypen:

Mit zusätzlich eingenommenen Drittmitteln ist es gelungen, einen funktionsfähigen Wirbelschichtreaktor für das Sintern kleinster keramischer Bauteile aufzubauen. Mit weiteren Drittmittel-Einnahmen soll der Wirbelschicht-Reaktor im Jahr 2017 in den Probetrieb überführt werden.

7 Schlussworte

Die Building II-Arbeitsgruppe hat die geplanten Forschungsarbeiten sehr erfolgreich durchgeführt. Dabei wurden neue wissenschaftliche Erkenntnisse erarbeitet, neue Produkte und Verfahren entwickelt sowie Demonstratoren aufgebaut. Bei einigen Entwicklungen sind noch zusätzliche Arbeiten notwendig, deren Markteinführung jedoch bereits in greifbare Nähe gerückt ist. Mit dem Forschungsvorhaben „Herzo Base-Energiespeicherhäuser“ erfolgt z. Zt. die Erstellung von 8 Plusenergie-Häusern als Modellvorhaben. Dabei werden die in der Forschergruppe erarbeiteten Ergebnisse mit der Erstellung von Musterhäusern umgesetzt. 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 Häuser erzielt wurde.

Die Arbeitsgruppe war bei der Einwerbung von Drittmitteln besonders erfolgreich und hat die Zielvorgaben in bedeutender Höhe übertroffen. Dadurch konnten zusätzliche Mitarbeiter eingestellt und die Laborausüstung ausgebaut werden. Es wurden eine ganze Reihe von Forschungsvorhaben erfolgreich beantragt, deren Laufzeiten noch weit über das Projektende des EnCN 1 hinausgehen.

8 Veröffentlichungen

- [1] Michael Beck, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Storing surplus solar energy in low temperature thermal storage for refrigeration applications. *Energy and Buildings*, 122, 192, 2016
- [2] Michael Beck, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Energetic Evaluation of Cold Storage Systems and Waste Heat Usage in Refrigeration and Freezing Applications. *Chemie Ingenieur Technik*, 87, 957, 2015
- [3] J. Obermeier, J. Zeilinger, W. Arlt, A. Bösmann, P. Wasserscheid, K. Müller. Combined Storage of Hydrogen and Heat using Liquid Organic Hydrogen Carrier and Metal/Metal Oxide Systems. *Sustainable Chemistry & Engineering*, submitted.
- [4] Buderus, J., Dentel, A., Stephan, W., Betzold, C.. Lastmanagement und Prognosemodelle in der TGA. *Ingenieurspiegel*, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur mbH, Bingen, 2015
- [5] Dentel, A., Betzold, C.. Entwicklung einer prädiktiven Betriebsführungsstrategie für Wärmepumpen in Verbindung mit thermischen und elektrischen Speichern. *Ingenieurspiegel*, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur mbH, Bingen, 2016
- [6] Buderus, J., Dentel, A., Stephan, W.. Model predictive control for air conditioning systems in production sites. *CLIMA 2016 – Proceedings of the 12th REHVA World Congress: Volume 8*. ISBN: 87-91606-33-0. Aalborg, Denmark, 2016
- [7] Kiessling, G.; Rieger, M.. Operational experience of a Darrieus H-rotor wind turbine using a sensor-less control concept. 2016-07-12. *iSEneC - Integration of sustainable energy conference*, Nuernberg
- [8] Schuesslbauer, S.; Kiessling, G.; Dentel, A.. Smart City Demo - A Simulation Model for Energy Consumption and Production Prognosis. 2016-07-11 *iSEneC. Integration of sustainable energy conference*, Nuernberg
- [9] Schuesslbauer, S.. Smart City Demo: A simulation model to analyze the energetic behaviour of a city quarter. 2016-06-24. *Applied Research Conference*, Amberg 2016
- [10] Schuesslbauer, S.; Kiessling, G.. Simulation of a Smart Grid Application Using Simulink. 2016-06-24. *Applied Research Conference*, Augsburg 2016
- [11] Keilbach, S.; Kiessling, G.. Testing and adjusting a MPP tracking DC/DC converter for a PV application. 2015-07-03. *Applied Research Conference*, Augsburg 2016
- [12] Schuesslbauer, S.; Kiessling, G.; Dentel, A.. Smart City Demo: A simulation model to support planning of modern city quarters. 2015-07-03. *Applied Research Conference*, Nuernberg 2015
- [13] Rieger, M.; Kiessling, G.. Commissioning of a wind turbine on a DC-Microgrid. 2015-07-03. *Applied Research Conference*, Nuernberg 2015
- [14] Kiessling, G.. Ortsnetz-Transformatoren in Netzen mit hohem Anteil an erneuerbarer, fluktuierender Stromerzeugung. 2013-07-04. *Technical University of Applied Sciences*, Ingolstadt
- [15] Kiessling, G.. Elektrische Energiesysteme – Fluktuierende und regelbare Leistung in intelligenten Verteilnetzen. 2013-06-28. *University of Applied Sciences*, Frankfurt
- [16] Kiessling, G.. Einsatzmöglichkeiten und Funktionsweise von energieeffizienten elektrischen Antriebssystemen. 2013-06-12. *Reinhold-Wuerth-University of Applied Sciences Künzelsau*
- [17] Kiessling, G.. Prinzip und Bedeutung der Blindstromkompensation in elektrischen Netzen. 2013-03-20. *University of Applied Sciences*, Biberach
- [18] Kiessling, G.. Smart Grids & Smart Buildings. 2012-03-20. *University of Applied Sciences*, Biberach
- [19] W. Krcmar. Bausteine für die Energiewende. *Zeitschrift Wirtschaft in Mittelfranken (WIM)*, 9/2013, S. 76
- [20] N. Wedel; W. Krcmar. Neuartige Trocknungsverfahren von keramischen Formlingen, 2. Zwischenbericht, ZIM Forschungsprojekt KF 2151802SU4, 31.01.2016
- [21] A. Geber; M. Döbbelin; W. Krcmar. Entwicklung einer Pilotanlage zur thermischen Behandlung organischer, metallischer und keramischer Mikrobauteile in der Wirbelschicht. *Schriftenreihe der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*, 2015, Heft 23
- [22] S. Schmidt; W. Krcmar. Einfluss von Zusatzstoffen auf werkstofftechnische Parameter von Dünnbettmörtel unter besonderer Berücksichtigung von Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit; Zwei Publikationen in Vorbereitung
- [23] E. Kränzlein; W. Krcmar. Erforschung ressourcen- und energieeffizienter Ziegel. *PTJ-Forschungsprojekt*, FKZ NW-1303-0007, 5. Zwischenbericht, 15.10.2016

9 Patente

Im Berichtszeitraum wurde eine Patentanmeldung mit dem Thema „Hochwärmedämmende Wandbaustoffe“ vorbereitet.



SIMULATION

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Department Mathematik (MATH) Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik Lehrstuhl für Angewandte Mathematik 2 Department Informatik (INF) Lehrstuhl für Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) Lehrstuhl für Informatik 10 (Systemsimulation)	TP1: Hybride Simulation intelligenter Energiesysteme (Prof. Dr. Reinhard German/FAU-I7) TP2: Gekoppelte Energienetze (Prof. Dr. Schmidt/FAU-Math) TP3: Simulationsbasierte Optimierung und Steuerung zur energieeffizienten Integration und Planung von Gebäuden und Siedlungen (Prof. Dr. Alexander Martin/FAU-Math) TP4: Virtuelle Gebäude im Kontext intelligenter Energieversorgungsnetze (Prof. Dr. Ulrich Rüde/FAU-I10, Prof. Dr. Günter Leugering/FAU-Math) TP5: Elektromobilität – Simulationsmethoden zur Bewertung und Validierung (Prof. Dr. Reinhard German/FAU-I7) TP6: Verknüpfung von Energiemodellen (Prof. Dr. Günter Leugering/FAU-Math)

Projektbericht EnCN1

Der Zubau von erneuerbaren Energieträgern und der wachsende Anteil dezentraler und stark fluktuierender Energiewandler stellen moderne Energiesysteme vor komplexe Herausforderungen. In diesem Kontext ist das Ziel des EnCN-Projekts SIMULATION die Verbesserung des strukturellen, betriebs- und versorgungstechnischen Managements von vernetzten intelligenten Energiesystemen, die optimale Planung von Energienetzen und die Erforschung mathematischer und informatischer Methoden zur quantitativen Beantwortung von ökonomischen Fragestellungen.

Aus den genannten Zielen ergibt sich u.a. die Notwendigkeit von Speichersystemen. Sowohl KWK-Anlagen mit Wärmespeichern, als auch reine Stromspeicher oder andere Technologien spielen eine entscheidende Rolle. Des Weiteren ist Kommunikation zwischen den Produzern und Consumern sowie deren intelligente Steuerung für die Stabilität und Effizienz des Energiesystems entscheidend.

Ein weiterer Aspekt sind die vorliegenden Marktmechanismen: Sie sind eine wichtige Entscheidungskomponente, da erneuerbare Energieträger aufgrund der geringen Grenzkosten nach dem aktuellen Preisbildungsmechanismus an der Strombörse und gemäß der aktuellen Rechtslage (EEG) vorrangig in das Netz einspeisen. Daraus ergibt sich, dass konventionelle Kraftwerke aufgrund der gesunkenen Marktpreise oft nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können, diese aber, so lange es nicht genügend grundlastfähige Speicher gibt, für die Netzstabilität unverzichtbar sind.

Eine große Herausforderung bei der Modellierung und Steuerung eines derartigen Energiesystems ist die wachsende Systemkomplexität, welche sowohl durch die oben erwähnten Punkte als auch durch die steigenden Unsicherheiten im System aufgrund der Volatilität der erneuerbaren Energieträger, wie z.B. Wind oder Photovoltaik, entsteht.

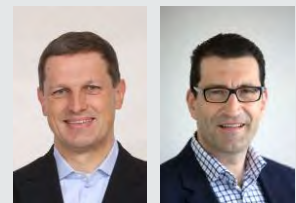
Um den daraus resultierenden Anforderungen gerecht zu werden, ohne auf der einen Seite in einer Grobapproximation die Realität und andererseits die Handhabbarkeit der Entscheidungshilfen aus dem Blick zu verlieren, muss eine hierarchische und adaptive Modellierung, Simulation und Optimierung entwickelt, getestet und implementiert werden.

Insgesamt ergeben sich hieraus die folgenden übergreifenden Ziele des EnCN Projekts SIMULATION:

- Optimale Auslegung, Planung und Kopplung von Energiesystemen;
- Optimaler Betrieb der Systeme;
- Robustheit gegenüber Schwankungen im Angebot nach Energieform, Menge, Marktwirtschaft und Verbrauch.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Alexander Martin
Prof. Dr. Reinhard German
 Friedrich-Alexander-Universität
 Erlangen-Nürnberg



Prof. Martin

Prof. German

E-Mail

Alexander.Martin@encn.de
 Reinhard.German@encn.de

Telefon

+49 9131 / 85 67163 (Prof. Martin)
 +49 9131 / 85 27916 (Prof. German)

Web

www.encn.de
<http://tinyurl.com/huouu6c>

Zur Erreichung dieser Ziele lassen sich auf den unterschiedlichen hierarchischen Ebenen des Energiesystems verschiedene Herausforderungen ableiten. Auf der Makroebene (Versorgungsnetze wie z.B. Gas, Wasser, Strom oder auch Verkehrsnetze auf nationaler und internationaler Ebene) sind dies die Grobnetzmodellierung, die diskrete Optimierung (bspw. Ausbauplanung) und die Abbildung und Lösung der Kommunikationsproblematik im Kontext des SmartGrids. Auf der Mesoebene (Versorgungsnetze auf der Ebene von Städten und Siedlungen) müssen Komponenten und effektive Vernetzungsmodelle modelliert, kombinatorische Entscheidungsmodelle gelöst, das System kontinuierlich simuliert sowie optimiert und Problemstellungen der Kommunikation hinsichtlich des SmartMeterings gelöst werden. Auf der Mikroebene (Versorgungsnetze auf der Ebene individueller und mehrerer Gebäude) geht es vordergründig um die Feinmodellierung der physikalischen Gegebenheiten von Gebäuden mit Blick auf die Integration in lokale Energienetze, Kompartmentsysteme, die Simulation, Optimierung und Steuerung kontinuierlicher Prozesse sowie Sensorik und sensordatengetriebene Steuerung und Regelung.

Diese Ebenen sind in einem Top-Down und Bottom-Up Sinne gekoppelt. Zum Beispiel kann eine auf der Basis einer Grobnetzmodellierung erstellte Simulation und Optimierung nicht die tatsächliche physikalische (reale) Auswirkung erfassen. Die Realsituation wiederum kann auf Basis der vorgeschlagenen Gesamtnetzsteuerung des Grobmodells mittels lokal feinauflösender Verfahren adaptiv nachoptimiert werden. Die Verzahnung von Grob- und Feinmodellen und deren Optimierung, Steuerung und Simulation war zu Beginn des EnCN Projekts SIMULATION aus mathematischer Sicht unerforscht und somit ein Alleinstellungsmerkmal. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal besteht darin, dass chemische und elektrische Technologien für den Transport, die Verteilung und die Speicherung von Energie in einem gemeinsamen Ansatz bewertet werden. Die Modelle in der Optimierung und die in der Simulation unterscheiden sich dabei in erster Linie dadurch, dass in der Optimierung primär die kombinatorischen Entscheidungen hinsichtlich Auslegung und Kopplung der Netze sowie eine optimale Steuerung der Netze bei festgehaltener Kombinatorik erfolgen sollten. Die Modelle der Simulation haben zum Ziel, die physikalischen Gegebenheiten so genau wie möglich abzubilden mit dem Fokus einerseits adäquate Vorhersagen treffen zu können und andererseits die Lösungen aus der Optimierung verifizieren zu können.

Das EnCN Projekt SIMULATION wurde somit perfekt aufgestellt und in fokussierte Teilprojekte untergliedert, um den oben beschriebenen, weltweit, aber in Deutschland durch die Entscheidung zur Energiewende mit einer sehr weitgehenden Umgestaltung des Energiesystems in noch stärkerer Weise bestehenden Herausforderungen zu begegnen. Zum einen können durch die Modelle Auswirkungen von Systemveränderungen untersucht werden. Dies gilt für Systeme in unterschiedlichen Größenordnungen: So kann auf der Mikroebene das Zusammenspiel verschiedener energietechnischer Komponenten eines einzelnen Haushalts erprobt und beispielsweise ermittelt werden, wie der Eigenverbrauch regenerativ bereitgestellter Energie, die Autarkie und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden können. Diese Maße besitzen sicher eine sehr große Auswirkung auf die individuelle Akzeptanz innovativer energietechnischer Komponenten und Konzepte. Auch auf der Mesoebene kann das Zusammenspiel verschiedener Komponenten im Energiesystem und die Auswirkungen der beschriebenen Veränderungen auf dieser größeren Systemebene untersucht werden. Neben diesen Fragestellungen zur Auslegung der Systeme erlauben die Modelle zum anderen auch die virtuelle Erprobung von Steuerungsverfahren für den optimierten Betrieb von einzelnen und vernetzten Energiesystemen. Diese Perspektive auf der Ebene von einzelnen Haushalten bis hin zum Zusammenspiel auf Siedlungsebene wurde u.a. in den Teilprojekten TP1, TP3 und TP4, dem assoziierten Projekt „Smart Grid Solar“ sowie dem Projekt SWARM eingenommen.

In weiteren Arbeiten wurde ein eher gesamtwirtschaftlicher Ansatz verfolgt. So wurde in dem Projekt „Energiesystemanalyse Bayern“ das elektrische Energieversorgungssystem Deutschlands mit Fokus auf Bayern untersucht. Modellergebnisse gaben Entscheidungsunterstützungen für die Umgestaltung des bayerischen elektrischen Energieversorgungssystems. Durch die Erweiterung der Modellierung hin zu einer hierarchischen Modellstruktur, anhand der das europäische Umfeld mitberücksichtigt wird, wird das bestehende Modell im vom BMWi geförderten Folgeprojekt „KOSiNeK“ auf Deutschland ausgeweitet. Dabei wird die erfolgreiche und bewährte Kooperation der bei der „Energiesystemanalyse Bayern“ beteiligten drei Lehrstühle weitergeführt, die sich ebenso im Projekt „Smart Grid Solar“ bewährt hat. Die in diesen Kooperationsprojekten geleistete Arbeit wird im Folgenden je Teilprojekt vorgestellt.

In folgenden Teilprojekten wurden weitere wichtige Bausteine des zukünftigen Energiesystems betrachtet: Das Gasnetz und seine Anbindung an das elektrische Energiesystem konnte durch die in TP2 und TP6 entwickelten Methoden und dem angebotenen Sonderforschungsbereich/Transregio 154 (Sprecher: Prof. Dr. Alexander Martin) sehr ausführlich analysiert werden. Wechselseitige Auswirkungen der Elektromobilität und des Energiesystems wurden in TP5 basierend auf detaillierten Simulationsmodellen analysiert.

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Ergebnisse und Entwicklungen der sechs Teilprojekte und assoziierter Drittmittelprojekte im gesamten Bewilligungszeitraum dar.

1 Hybride Simulation intelligenter Energiesysteme

Ziel dieses Teilprojekts war die Simulation intelligenter Energiesysteme mittels Nachbildung des Zusammenspiels von verschiedenen Erzeugern (zentral und dezentral, konventionell und regenerativ), Verbrauchern (konventionell und adaptiv) und Speichern (Pumpwasser, Batterien, chemische Trägerstoffe etc.) in durch Informations- und Kommunikationstechnik angereicherten Verteil- und Übertragungsnetzen. Die Fluktuation regenerativer Energieerzeugung wurde geeignet durch stochastische Prozesse und die Dynamik der Netze durch kontinuierliche Differentialgleichungen modelliert. Hierfür wurden Modellierungskonzepte, Auswertungsverfahren, Werkzeugumgebungen und Modellbibliotheken geschaffen und weiterentwickelt, die es ermöglichen, intelligente Energiesysteme auslegen und auf der Mikroebene einzelner Häuser und Hausverbände umfassend analysieren zu können. Weiterhin können Teilnehmer mit verschiedenen Rollen (z.B. Erzeuger, Netzbetreiber, Stromhändler, Verbrauchergemeinschaften) im liberalisierten Markt mit den entwickelten Methoden und Werkzeugen Szenarien überprüfen und daraus verschiedene quantitative Zielgrößen ableiten (wie z.B. Lasten einschließlich Lastumkehr in Verteilnetzen, Effizienzpotentiale, Auswirkungen von Preisgestaltungen etc.). Die in diesem Teilprojekt bearbeiteten Themen ordnen sich u.a. in die Professur „Energieinformatik“ ein, die sich neben der hybriden Simulation auch mit Fragen der Software- und Kommunikationsarchitektur von intelligenten Energienetzen befasst. Sie wurde 2016 durch Herrn Dr.-Ing. Marco Pruckner besetzt. Außerdem wurden mit den Fördermitteln für Personalkosten Herr Dipl.-Inf. Peter Bazan zum 1.10.2011 und Herr David Steber zum 01.02.2015 als wissenschaftliche Mitarbeiter eingestellt.

Im Teilprojekt wurde zunächst die Schaffung einer Simulationsumgebung fokussiert, in der Architekturen intelligenter Energiesysteme untersucht werden können. Hierbei sollten dynamische Aspekte bei der Energieerzeugung und -nutzung durch kontinuierliche Simulation, Mechanismen der IKT, Schwankungen und Fehler durch diskrete Ereignissimulation nachgebildet werden. Dazu entstand der auf der kommerziellen Simulationssoftware AnyLogic basierende, komponentenbasierte Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy [1], der die schnelle Entwicklung hybrider Simulationsmodelle vernetzter intelligenter Energiesysteme ermöglicht. Dazu werden Methoden wie die diskrete Ereignissimulation (z.B. für Verbraucher-, Wetter- und Steuermodelle) und System Dynamics Modelle (z.B. für Energie- und Kostenflüsse) in einem Simulationsmodell verbunden.

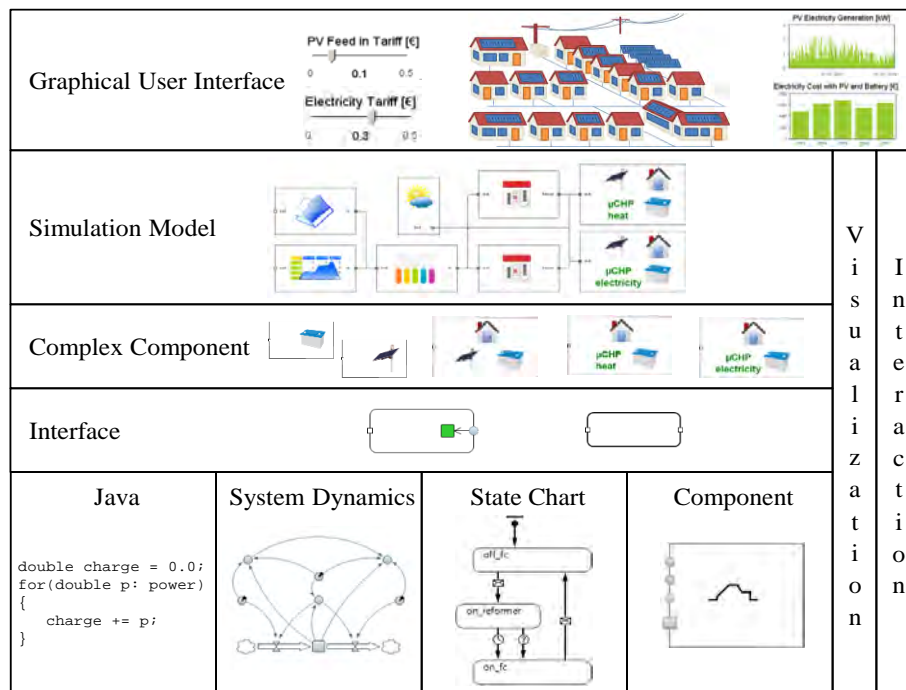


Abbildung 150: Die Softwarearchitektur des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy für die Simulation hybrider Energiesysteme.

Aus den Basiskomponenten für den Energiebedarf (elektrisch und thermisch), für die Energiewandlung (z.B. Gasheizung, Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen), für erneuerbare Energien (Photovoltaik), für die Energiespeicherung (Batterien, chemische Speicher wie z.B. basierend auf LOHC), sowie für die intelligente Steuerung können einfach Hausmodelle erstellt und zu Verbänden mit einem gemeinsamen Wettermodell und einem Kommunikationsnetz gekoppelt werden [5][7]. Weiterhin wurde ein flexibles komponentenbasiertes Schnittstellenkonzept (Interface) mit dem Ziel eines guten Laufzeitverhaltens aufgebaut sowie eine grafische Benutzeroberfläche implementiert [33]. Außerdem wurde die entwickelte Simulationsumgebung i7-AnyEnergy mit verschiedenen Simulations- und Optimierungswerkzeugen gekoppelt. Abbildung 150 zeigt die Softwarearchitektur des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy.

Insgesamt ermöglicht i7-AnyEnergy somit insbesondere die Untersuchung von Szenarien für neue Geschäftsmodelle, in denen neben den klassischen Energieversorgern neue Marktakteure als Energieanbieter auftreten und in denen sich „Prosumer“ selbstorganisiert zusammenschließen. So können aus verschiedener Perspektive und auf verschiedener Ebene Energieeffizienz und ökonomische Aspekte verschiedener Energiearchitekturen bewertet werden (z.B. für die Frage der Rentabilität und der Preisgestaltung eines Geschäftsmodells oder volkswirtschaftliche Betrachtungen des Gesamtsystems). i7-AnyEnergy adressiert somit eine Vielzahl an aktuell aus der Energiewende resultierenden Fragestellungen. Dies führte zu einer regen Anwendung des Simulationsbaukastens in verschiedenen Projekten, die nachfolgend mit ihren Kernergebnissen vorgestellt werden.

Zunächst wurden mehrere Anwendungsszenarien modelliert und analysiert. Die grafische Benutzeroberfläche von i7-AnyEnergy in Kombination mit dem implementierten Schnittstellekonzept ermöglicht eine interaktive Auslegung der Modelle. Anhand eines Hausmodells, das eine Photovoltaikanlage zur Energiebereitstellung und einen Batteriespeicher berücksichtigt [6], können bspw. die Auswirkungen unterschiedlicher, während der Simulation einstellbarer PV-Peakleistungen oder Batteriekapazitäten hinsichtlich verschiedener Kenngrößen (z.B. Eigenverbrauch, Kosten) direkt beobachtet werden. Dies wurde anhand eines zeitweise im Internet zugänglichen interaktiven Modell eines Hauses (s. Abbildung 151) realisiert.

Ergänzend wurden die jährlichen Energiekosten eines Hauses mit wärmegeführter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) basierend auf einer Brennstoffzelle mit denen einer elektrizitätsgeführten KWK für verschieden Batteriegrößen verglichen [32]. In den Simulationsmodellen wurden die Elektrizitäts-, Wärme-, Gas- und Energiekostenflüsse abgebildet. Die Energiekosten lagen bei der Wärmeführung bei allen Batteriegrößen deutlich unter denen des Hauses mit elektrizitätsgeführter KWK.

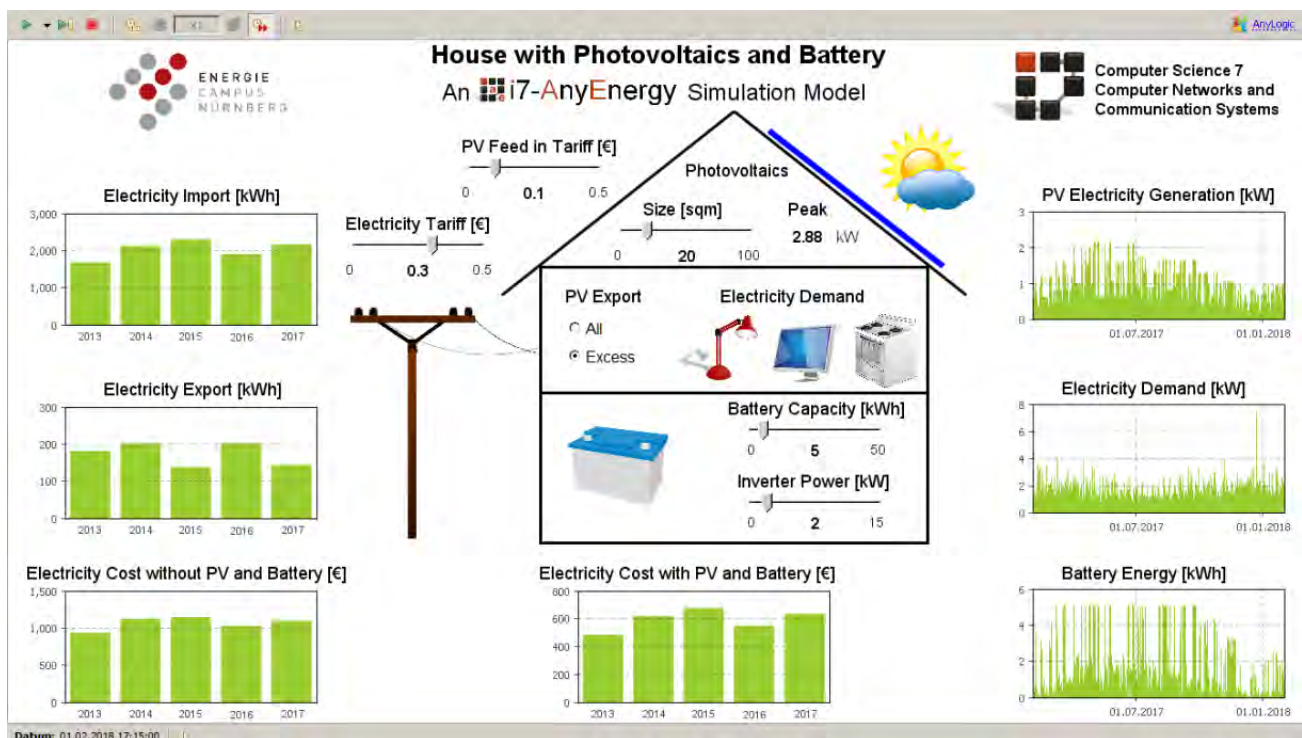


Abbildung 151: Mit dem Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy erstelltes, interaktives Hausmodell

Die somit bewiesene hohe Flexibilität des Simulationsbaukastens ermöglichte es, weitere unterschiedlichste Anwendungsszenarien und Prozesse zu modellieren und analysieren. Beispielsweise wurden eine Tankstelle mit zwei Photovoltaikanlagen, einer Batterie und fünf Zapfsäulen oder der Betrieb eines Wasserhochbehälters mit PV-Anlage und Batterie modelliert und simuliert.

In 2013 wurde die Kooperation mit dem ZAE Bayern e.V. im Projekt Smart Grid Solar [3] in Hof begonnen. Bei dem Projekt handelt es sich um ein Kooperationsprojekt, welches vom ZAE Bayern e.V. geleitet wird und dessen Arbeitspaket ‚Optimierung und Simulation non Netzen‘ von Herrn Prof. Martin und Herrn Prof. German wissenschaftlich geleitet wird. Ziel des Projekts ist es, Optimierungs- und Simulationsmodelle zu erstellen, um Siedlungen mit Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern (s. Abbildung 152) zu bewerten, zu optimieren und gegebenenfalls den späteren Betrieb zu unterstützen. Dabei werden Modelle aus dem EnCN – Projekten wie z. B. der Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy als Basis für die Modellierung verwendet bzw. diese um wichtige Komponenten erweitert und im Rahmen der EnCN – Teilprojekte integriert. Dazu zählt ein kinetisches Batteriemodell, das nichtlineare Effekte berücksichtigt. Auch ein ortsabhängiges Sonneneinstrahlungsmodell wurde integriert, dazu ein vom Einstrahlungswinkel abhängiges Photovoltaikmodell mit Berücksichtigung der diffusen Einstrahlung und ein Wolkenmodell. Damit wurde eine zeitlich

hochaufgelöste Simulation von Solarstrahlung zur Bewertung von Smart Grids durchgeführt [25]. Aus Sicht der Optimierung ist das Ziel, Batteriespeicher als zusätzliches Betriebsmittel bzw. deren Steuerung in intelligente Stromnetze zu integrieren.

Ein Speicher kann hier neben der Maximierung von Eigenverbrauch oder Autarkie für unterschiedliche weitere Ziele eingesetzt werden. Beispielsweise kann er verwendet werden, um die notwendige Anschlussleistung (maximal auftretende betragsmäßige Residual-Last) zu minimieren oder die Residual-Last besser planbar zu machen, indem kurzfristige, starke Schwankungen (z.B. durch Bewölkung) geglättet werden. Ersteres spielt insbesondere für die Netzstabilität bzw. die Belastung der Betriebsmittel (Kabel, Wechselrichter, Transformatoren, ...) eine wichtige Rolle und letzteres kann helfen, um die Kapazitäten der Betriebsmittel gezielter auszuschöpfen. Erste Untersuchungen zeigen, dass Steuerungen gefunden werden können, die sowohl die benötigte Anschlussleistung minimieren als auch den Eigenverbrauch maximieren.



Abbildung 152: Screenshot des im Rahmen vom Smart Grid Solar entwickelten Simulationsmodells einer Siedlung

Anhand des Modells eines virtuellen Kraftwerks bestehend aus 80 Häusern mit jeweils einer Photovoltaikanlage und Batterie wurde untersucht, ob ein solcher Verbund ausreichend Leistung zur Teilnahme am Primärregelleistungsmarkt bereitstellen kann [30]. Es wurde gezeigt, dass bei der gegebenen Dimensionierung und Strategie die geforderte Mindestleistung von 1 MW knapp erreicht wird und für kurze Zeit zur Verfügung gestellt werden kann. Diese Vorarbeiten trugen entscheidend zur erfolgreichen Akquise der wissenschaftlichen Begleitforschung im Rahmen des Kooperationsprojekts SWARM (Storage With Amply Redundant Megawatt) der N-ERGIE Aktiengesellschaft und der Caterva GmbH bei. Das Projekt SWARM startete im Frühjahr 2015. Hierbei werden technische und ökonomische Fragestellungen analysiert, die sich unter anderem mit der wirtschaftlichen und netzverträglichen Betriebsweise eines real installierten virtuellen elektrischen Großspeichers zur Erbringung von 1 MW Primärregelleistung beschäftigen. Der Speicherverbund besteht aus vielen einzelnen, in an die Niederspannungsebene angeschlossenen Haushalten mit PV-Aufdachanlage installierten Batteriespeichersystemen (vgl. Abbildung 153). Zur wissenschaftliche Begleitung dieses durch BayInvent geförderten Projekts SWARM sowie zur Analyse und Bearbeitung der zum Teil fachgebietsübergreifenden Themenstellungen sind folgende, auch am EnCN vertretene Lehrstühle der FAU involviert: Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme (EES), Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre insb. Wirtschaftstheorie (VWL) und Lehrstuhl für Informatik 7 – Rechnernetze und Kommunikationssysteme (Informatik 7). Informatik 7 übernimmt dabei die Aufgabe der zeitlich hochaufgelösten Simulation des virtuellen Großspeichers im Betrieb mittels des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy und analysiert den ökonomischen Nutzen sowohl für beteiligte Privathaushalte als auch für das gesamte System und schätzt die technische Auswirkungen z.B. auf das angeschlossene Verteilnetz ab.

Zunächst wurde ein Simulationsmodell erstellt, das 65 Kleinspeicher in Haushalten und deren technische Parameter sowie die der dort installierten PV-Anlagen berücksichtigt [28]. Zentrale sowie dezentrale Steueralgorithmen zur Erbringung von Primärregelleistung und zum Management der Leistungsflüsse im Haus wurden abstrakt nachgebildet und implementiert [34][36][38]. Bei der Anwendung einer Schnelladestrategie können hohe Gradienten der Netzeinspeisung von PV-Leistung auftreten, wohingegen die Anwendung einer vorhersagebasierten Strategie glättend auf die Einspeicherung wirkt und hohe Leistungsgradienten für das

Netz vermeidet. Eine erste Bewertung zeigte eine deutliche Erhöhung von Eigenverbrauch und der Autarkie, sowie die Rentabilität der Investition in ein Batteriespeichersystem für den Haushalt.

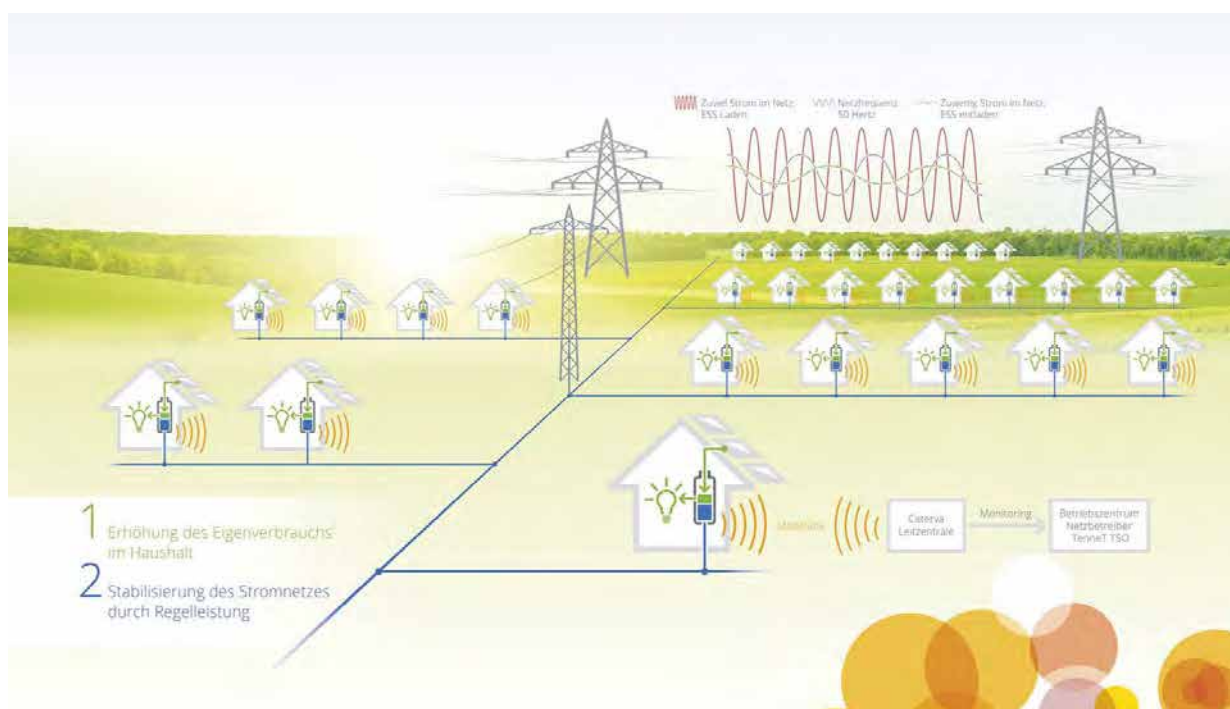


Abbildung 153: Aufbau des virtuellen Großspeichers SWARM; Quelle: Caterva GmbH

Aufgrund der Veröffentlichung neuer Regularien durch die deutschen Übertragungsnetzbetreiber im Jahr 2015 wurden diese analysiert und die darin enthaltenen Vorgaben im Simulationsmodell implementiert. Werden die aus den Regularien resultierenden Freiheitsgrade lokal von jedem Batteriespeichersystem autark ausgenutzt, so ergeben sich für den Haushalt keine merklichen Nachteile. Der Betreiber des virtuellen Großspeichers sieht sich allerdings einem erhöhtem Nach- und Entladebedarf ausgesetzt. Weiterhin wurde ein Batteriespeichersystemmodell mit nichtlinearen, leistungsabhängigen Eigenschaften im Simulationsmodell implementiert. Die Bewertung der Simulationsergebnisse mit wirtschaftlichen Parametern zeigte, dass die Möglichkeit, ein Batteriespeichersystem käuflich zu erwerben am robustesten gegenüber Änderungen der wirtschaftlichen Parameter Strompreis und Strompreissteigerungsrate ist. Weiterhin wurden Methoden implementiert, die die Einbindung von real im Projekt gemessenen Zeitreihen der Haushaltslast und PV-Einspeisung in das Modell ermöglichen. Hiermit erfolgte die positive Validierung des mithilfe des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy erstellten Simulationsmodells. Es konnten, basierend auf Realdaten, zufriedenstellend übereinstimmende Verläufe des SOC mit dem Simulationsmodell generiert werden.

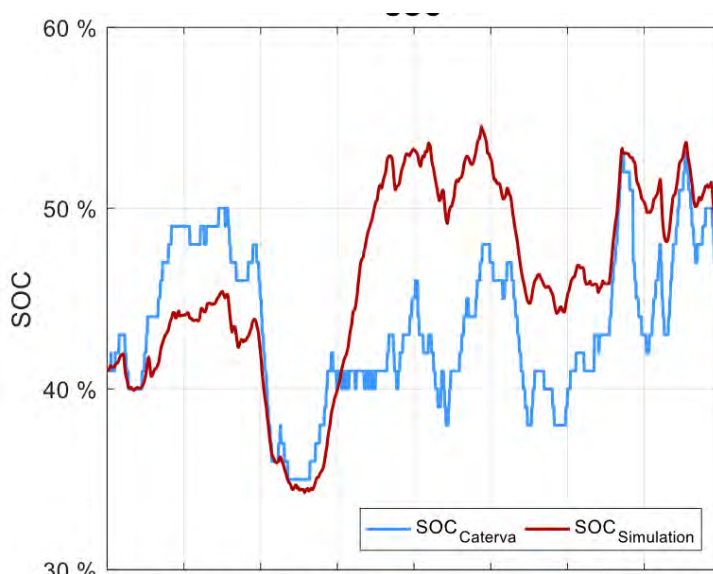


Abbildung 154: SWARM - Vergleich realer und simulierter SOC

In einem aus SWARM abgeleiteten Projekt wurde ein i7-AnyEnergy Simulationsmodell mit 400 Häusern mit dem im Rahmen der Energiesystemanalyse Bayern entstandenen Simulationsmodell des Energiesystems Deutschland gekoppelt und damit für verschiedene Szenarien und einer Hochrechnung auf 200.000 Häusern die Bestimmung von fairen Preisen für die Bereitstellung von Regelleistung durch Häuser mit PV und Batterie durchgeführt [30]. Je nach Ausbau der erneuerbaren Energien variierten die zusätzlichen Stromkosten eines Hauses mit einer 10 kWh Batterie zwischen 70 € und 200 € pro Jahr und mit einer 20 kWh Batterie zwischen 400 € und 620 € pro Jahr. Dabei konnte bei einer 20 kWh Batterie der Anteil der von den Häusern zur Verfügung gestellten positiven Regelleistung im Vergleich zu einer 10 kWh Batterie verdoppelt werden. Der Anteil der von den Häusern gelieferten negativen Regelleistung stieg dagegen nur um ca. 10 %. Im besten Szenario konnten bis zu fast 70 % der angeforderten negativen Regelleistung und bis zu ungefähr 20 % der angeforderten positiven Regelleistung in Bayern zur Verfügung gestellt werden.

Aus den Tätigkeiten im Projekt SIMULATION konnte bereits mit Beginn zum März 2012 ein Drittmittelprojekt mit einer Laufzeit von zunächst zwei Jahren bis Februar 2014 akquiriert und gemeinsam bearbeitet werden, bei dem im Auftrag verschiedener Unternehmen (Allgäuer Überlandwerke GmbH, Areva NP GmbH, BayWa (RENERCO AG), E.ON AG, infra Fürth GmbH, Kraftanlagen München GmbH, OMV Power International, OSTWIND Verwaltungsgemeinschaft mbH, Siemens AG, SWU Energie GmbH, Tennet TSO GmbH, ThüGa AG, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bayern Innovativ - Bayerische Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer mbH) eine Analyse des elektrischen Energieversorgungssystems in Bayern durchgeführt wurde [2].

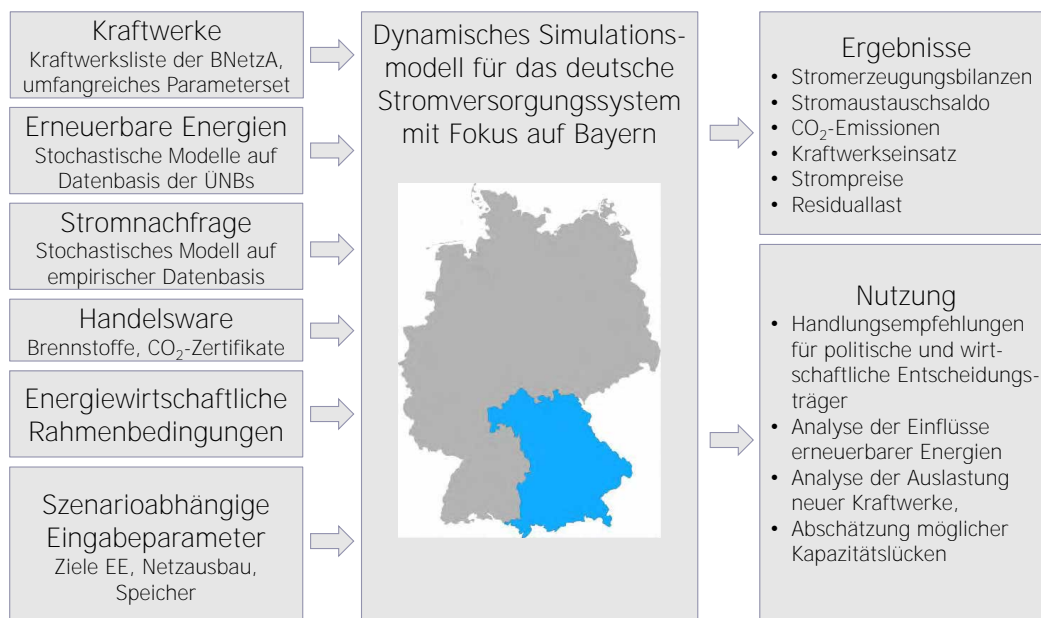


Abbildung 155: Energiesystemanalyse Deutschland mit Schwerpunkt auf Bayern

Nach einer sehr erfolgreichen Projektphase [14] wurde das Vorhaben Mitte des Jahres 2014 für weitere zwei Jahre durch die bayerische Staatsregierung weiter gefördert. Im Jahr 2015 wurden deshalb die bestehenden Modelle über die Bilanzgrenze Bayerns hinaus erweitert. Gegenwärtig wird das gesamte deutsche elektrische Energieversorgungssystem in der gleichen Granularität wie zuvor das bayerische Energiesystem betrachtet. Durchgeführt werden die Arbeiten am Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik, Lehrstuhl für Rechnernetze und Kommunikationssysteme und Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme. Das gegenwärtige gekoppelte Energiesystemmodell besteht aus einem Optimierungs-, Simulations- und elektrischen Netzmodell. Mit diesem Modell können die Auswirkungen des Energieumstiegs (Abschaltung der Kernkraftwerke, forcierter Ausbau von erneuerbaren Energieträgern, ggf. Ausbau von Gaskraftwerken und Speichern) hinsichtlich verschiedener Ausgabeparameter analysiert werden. Mit Hilfe des Optimierungsmodells können kostenoptimale Ausbaupfade bestimmt werden, diese können an das Simulationsmodell übergeben und in einer zeitlichen hohen Auflösung analysiert werden. Schließlich können mit dem elektrischen Netzmodell Lastflusssimulationen basierend auf den simulierten Kraftwerkspark durchgeführt werden. Alle Modelle greifen grundsätzlich auf eine identische Datenbasis zurück, so dass eine große Konsistenz der Ergebnisse gewährleistet wird. Darüber hinaus wurde aus Gründen der Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit ein Mehrpunktmodellansatz entwickelt, welcher sowohl im Optimierungs- als auch Simulationsmodell zum Einsatz kommt. Gegenwärtig wird die Modellregion Deutschland durch fünf Punkte repräsentiert, die sich grundsätzlich an den vier Netzgebieten der Übertragungsnetzbetreiber plus Bayern orientieren. Somit sind detaillierte Aussagen speziell für das bayerische elektrische Energieversorgungssystem gewährleistet

[15][16][17][18][19][20][21][22][23][24][26]. Im Rahmen der Entwicklung des Simulationsmodells entstand im Jahr 2015 eine Dissertation [29] am Lehrstuhl für Rechnernetze und Kommunikationssysteme. Die Arbeiten im Rahmen der Energiesystemanalyse werden ab dem 1.10.2016 im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts ‚KOSiNeK‘ in einem europäischen Kontext fortgeführt.

Resultierend aus den umfassenden beschriebenen Tätigkeiten im Bereich Simulation wurde in Zusammenarbeit mit der thyssenkrupp Transrapid GmbH ein Anwendungsfall für ein Cross Energy Management am Beispiel eines Zementwerks untersucht [40]. In diesem Rahmen wurden zwei Simulationsmodelle in Anlehnung an zwei bestehende Zementwerke entwickelt, in die zusätzlich eine Windkraftanlage und eine Redox-Flow-Batterie integriert wurden. Der Strom wurde dabei einerseits aus festen Lieferverträgen bezogen, andererseits vom Day-Ahead Markt mit variablen Preisen. Die Simulation der Anlagen erfolgte mit und ohne Netzdienstleistung (Sekundärregelleistung) sowie mit und ohne Batterie und Windkraftanlage. Die Zielsetzung war es, Zeitverläufe erzeugter Produktmengen und bezogener Leistung in den genannten Szenarien und energiewirtschaftliche Betrachtungen durchzuführen. Die Steuerung verwendete Prognosen über 24 Stunden für den Wind und die abgerufene Regelleistung. Im Simulationsmodell wurden dabei die Prognoseabweichungen berücksichtigt. Weiterhin wurde die Simulation mit einer Optimierung gekoppelt, um die Strombezugskosten zu minimieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Stromkosten durch die zusätzliche Erbringung von Sekundärregelleistung und durch die Nutzung von Windenergie und der Redox-Flow Batterie gesenkt werden können.

Der in Zusammenarbeit mit der thyssenkrupp AG entwickelte Anwendungsfall für ein Cross Energy Management am Beispiel einer Zementanlage wurde parallelisiert und innerhalb eines umfassenden Parameterraums analysiert. Bei den heute auch in Desktopsystem üblichen Mehrkernprozessoren kann durch die Parallelisierung rechenintensiver Programme ein deutlicher Geschwindigkeitszuwachs erzielt werden. Der Anwendungsfall wurde für ein Zementwerk mit veränderten Parametern entwickelt und in eine Parallelisierungsumgebung eingebettet. Damit belief sich die Laufzeit für einen Simulationsdurchlauf über ein Jahr inklusive der Optimierung auf 39 Sekunden bei einer Auflösung von 0,01 Stunden.

Der Parameterraum wurde durch die maximale Leistung der Windkraftanlage, die Kosten der Windenergie, die Kapazität der Redox-Flow Batterie, den Anteil der Energie durch Over-the-Counter (OTC) Geschäfte und die Kosten der Energie durch diese Geschäfte aufgespannt. Im besten Fall konnten die Stromkosten pro Tonne Zement um 0,47 € reduziert werden, bei einer Reduktion des CO₂-Ausstosses um 3.000 Tonnen pro Jahr [40].

Weiterhin fand über die Jahre eine kontinuierliche Zusammenarbeit mit dem Projekt TRANSPORT statt. Dazu wurden mit einem Simulationsmodell basierend auf i7-AnyEnergy umfangreiche Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse an das Projekt TRANSPORT übergeben. Das Simulationsmodell bildete ein Haus mit den Komponenten PV, Batterie, Wärmespeicher und LOHC-Speicher ab. Die Dimensionierungen dieser Komponenten wurden zusammen mit den Anfangszuständen variiert, so dass sich 1000 verschiedene Parametervariationen ergaben. Die Simulationsergebnisse wurden als stündliche Werte über ein Jahr ausgegeben. Neben dem Strombezug des Hauses vom Netz, der PV oder vom LOHC-Speicher wurden auch die entsprechenden Stromexporte berechnet. Weitere Ergebnisse waren der Gasbezug sowie der Eigenverbrauchs- und der Autarkiegrad. Die Auswertung ergab einen Autarkiegrad von bis zu 25 % und einen Eigenverbrauchsgrad von bis zu 90 % unter der Berücksichtigung von Strom und Wärme.

Aspekte der Informationssicherheit und Privatsphäre wurden parallel weiterentwickelt, so dass Aussagen hierüber möglich und verschiedene Sicherheitsstufen realisierbar sind. Diese Themen wurden über eine lehrstuhlinterne Zusammenarbeit abgedeckt, die auf den Gebieten der Servicequalität der Kommunikation über LTE in SmartGrid Anwendungen und der Sicherung der Privatsphäre stattfand [8][9][10][11][12][13][27] [31][32] [35][37]. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Absicherung von Smart Metern gegenüber der Verletzung der Privatsphäre entwickelt und ihre Wirksamkeit erfolgreich untersucht. Simulationsmodelle wurden mit der Modellierung von Kommunikationsmechanismen und einer Optimierungskomponente gekoppelt [8][9][10][11]. Inhalt sind hierbei Häuser, die über ein Kommunikationsnetz mit einer Leitstation kommunizieren und Vorhersagen über die Entwicklung des Wetters und von Preisen erhalten. Dadurch ist eine gegenüber der Maximierung der Eigenversorgung kostenmäßig optimierte Betriebsführung möglich. Diese Arbeiten wurden um Untersuchungen weiterer Mechanismen wie Demand Response [12] ergänzt. Hierbei ist ein Teil des Energieverbrauchs eines Haushalts zeitlich verschiebbar, so dass die Optimierung des Betriebsverhaltens, unter Berücksichtigung von täglichen Vorhersagen des Strompreises, der Last und des Angebots an Strom, zu einer Kosteneinsparung führt. In einer weiteren Arbeit wurde ein Simulations- und Optimierungsmodell für Häuser entwickelt, die an einen Photovoltaikpark, einer Windkraftanlage und an einem KWK-Kraftwerk angeschlossen sind [13]. Hierbei wurden auch die Anforderungen an das Kommunikationssystem untersucht, die sich durch den Einsatz zeitsynchronisierter Zeitmessgeräte (Phasor measurement units, PMU) zur Sicherstellung der Netzstabilität ergeben. Der Simulationsbaukasten SGsim verbindet dabei OMNeT++ (Kommunikation), OpenDSS (elektrische Komponenten und Netze) und OpenPDC (Echtzeitverarbeitung und Konzentration von Zeitreihen komplexer Messwerte) für die Anbindung echter oder simulierter PMUs. Damit wurden Modelle im Bereich der optimalen Lastverteilung in Übertragungsnetzen, der optimalen Ladezeiten von Elektroautos und der Weitbereichsüberwachung mittels PMUs erstellt. Die lehrstuhlinterne Zusammenarbeit führte zu der Erweiterung des Co-Simulationsbaukasten SGsim um Komponenten für Haushaltsgeräte. Außerdem ist die Software SGsim open source verfügbar und somit für eine Vielzahl potenzieller Anwender verfügbar.

Durch den vielseitigen Einsatz des Simulationsbaukastens i7-AnyEnergy und die Kopplung des Siedlungsmodells mit dem im Rahmen der Energiesystemanalyse Bayern entstandenen Simulationsmodell des elektrischen Energieversorgungssystems Deutschland werden wesentliche Inhalte des neu entstehenden Gebiets „Energieinformatik“ abgedeckt. Die Besetzung der Juniorprofessur für Energieinformatik erfolgte Anfang 2016 durch Herrn Dr.-Ing. Marco Pruckner. Hier wurde bereits eine Vielzahl von Projekten bearbeitet. So fand in Kooperation mit der noris network AG die Modellierung und Simulation eines energieeffizienten Rechenzentrums unter Berücksichtigung der IT-Komponenten und der energetischen Infrastruktur statt. In Kooperation mit dem Fraunhofer UMSICHT erfolgt eine modellgestützte Analyse der flexiblen und effizienten Verwendung von Strom aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien für den öffentlichen Personennah- und motorisierten Individualverkehr. Hinsichtlich der Aktivitäten im Bereich der Energiesystemanalyse erfolgte die simulationsgestützte Analyse und Bewertung innovativer Algorithmen für die Lastflussberechnung elektrischer Energieversorgungssysteme. Die Auswertung der Simulation erfasst, inwiefern die einzelnen Netzkuppelkapazitäten zwischen den deutschen Bundesländern überlastet sind und welche Auswirkungen der Ausbau einzelner Netzkuppelkapazitäten zur Folge hat. Weitere Ausgabeparameter geben Aufschluss über evtl. entstehende Kapazitätslücken.

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf diesem Gebiet wird dabei einerseits durch die seit dem Wintersemester 2016/2017 angebotene Lehrveranstaltung Modellierung, Optimierung und Simulation von Energiesystemen (MOSES; Prof. Dr.-Ing. Marco Pruckner) sichergestellt. Andererseits findet die Lehrveranstaltung SmartGrid statt, welche die am Lehrstuhl behandelten Themen interdisziplinär verknüpft.

Die Forschungsarbeiten wurden auch auf der Hannover Messe, internen EnCN Konferenzen und auf der Langen Nacht der Wissenschaften durch Poster und Vorträge präsentiert.

2 Gekoppelte Energienetze

Ziel dieses Teilprojekts war die optimale Planung von Energienetzen unter Einbeziehung aller relevanten Energieformen (Wärme, Strom, Gas) und Energiespeicher (elektrische, chemische, thermische und mechanische). Für die daraus resultierenden Optimierungsprobleme sollten neue Verfahren zur effizienten Lösung entwickelt und umgesetzt werden. Die gleichzeitige Berücksichtigung aller Arten von Energienetzen und -speichern war zum Zeitpunkt der Antragsstellung in der Literatur nicht behandelt und wird in diesem Teilprojekt erstmals untersucht.

Die inhaltliche Ausrichtung dieses Teilprojekts hat sich, wie bereits in den beiden vergangenen Jahresberichten erwähnt, durch die Besetzung der W1-Professur „Optimierung von Energiesystemen“ durch Dr. Martin Schmidt leicht verschoben. Die Forschungsschwerpunkte dieses Teilprojekts bestehen seit der Besetzung der genannten Professur im April 2014 aus der mathematischen Modellierung und Optimierung von Energiesystemen. Hierbei werden insbesondere (i) Planungsprobleme für Gas- und Stromtransportnetze, (ii) optimale Steuerungen für Smart Grids sowie (iii) bestehende und alternative Marktdesigns im Strom- und Gasbereich mit Methoden der nichtlinearen gemischt-ganzzahligen sowie mehrstufigen Optimierung untersucht.

2.1 Optimale Planung von Gasnetzen

Im Bereich der optimalen Planung von Gastransportnetzen ist es durch Arbeiten der EnCN-Mitarbeiter heute möglich, Problemstellungen auf Netzen nationaler Größenordnung zu lösen [44][49][50][54][55][56][57][58][59][60][61][62][63]. In weiterführenden Arbeiten wurde dabei insbesondere die Gaszusammensetzung in die Modelle integriert [52], was in Zukunft im Kontext von Fragestellungen der Kopplung verschiedener Energieträger wie Strom und Gas durch Power2Gas-Techniken sehr wichtig sein wird. Neben der Beantwortung von speziell für die Energiewende wichtigen Fragen haben die Arbeiten in diesem Forschungsbereich auch zu grundlegenden algorithmischen Neuerungen in der nichtlinearen, nichtglatten und gleichgewichtsrestringierten algorithmischen Optimierung geführt [42][53]. Des Weiteren wurde eine neue mathematische Verfahrensklasse untersucht, die durch die methodischen Arbeiten zur Lösung von Gastransportproblemen motiviert ist, aber in verallgemeinerter Form auch allgemeine gemischt-ganzzahlige lineare oder nichtlineare Optimierungsprobleme lösen kann [43]. Teile der genannten Arbeiten führten dazu, dass den EnCN-Mitarbeitern des Projekts SIMULATION im Jahr 2016, gemeinsam mit anderen Ko-Autoren, der EURO Excellence in Practice Award verliehen wurde.

Die optimale Steuerung von Gastransportnetzen wird auch weiter Forschungsthema sein. Ergänzend werden aktuell bereits erste Arbeiten zur Analyse von deutschen und europäischen Gasmarktmechanismen in Kooperation mit dem EnCN Projekt ECONOMY vorgenommen, die in den kommenden Jahren intensiviert wird und auch ein zentraler Punkt der beantragten Forschungsgelder für die zweite Phase des EnCN im Rahmen des Projekts „Energiemarktdesign“ ist.

2.2 Optimaler Betrieb und Bilevel-Modellierung von Smart Grids

Das im Rahmen dieses Projekts erarbeitete Modell eines Micro-Grids auf Siedlungsebene zur optimalen Steuerung für dezentrale Energieerzeugung mit Einsatz erneuerbarer Energiequellen sowie Kraft-Wärme-Kopplung wurde im Jahr 2016 in einem interdisziplinären Seminar zur Energiemarktmodellierung am EnCN sowie auf der iEnec-Konferenz in Nürnberg vorgestellt. Darauf basierende gemeinsame Arbeiten mit den Mitarbeitern des Projekts ECONOMY (Prof. Dr. Grimm, Prof. Dr. Zöttl) ergab die daraufhin erfolgte Erweiterung des Modells in marktwirtschaftliche Richtung durch Einführung eines zusätzlichen Akteurs. Dieser Akteur repräsentiert einen Stromlieferanten, der im Gegensatz zum herkömmlichen Tarifschema für Privatkunden einen vergünstigten Tarif mit einer bestimmten Menge an Stromlieferungsunterbrechungen anbietet und damit die starken Schwankungen des Strommarktes ausgleichen kann. Ein derartiger Tarif muss zudem wettbewerbsfähig, d.h., auch für Prosumer attraktiver als der konventionelle sein. In Kooperation mit dem Projekt ECONOMY wurde das bereits bestehende Steuerungsmodell des Prosumers in einen ökonomischen Kontext eingebettet, der Anstöße für die Weiterentwicklung von Stromtarifen geben kann. Die daraus resultierende Problemstellung der Formulierung geeigneter Tarifbedingungen stellt ein nicht-konvexes gemischt-ganzzahliges zweistufiges mathematisches Optimierungsproblem dar, das mit kommerziell verfügbarer Software nicht lösbar ist. Ziel der aktuellen und weiteren Arbeiten in diesem Bereich ist die Entwicklung problemspezifischer mathematischer Lösungstechniken für diese Art von Modellen.

2.3 Energiemarktdesign

Im dritten Bereich des Teilprojekts, der Analyse und Bewertung von Strom- und Gasmarktmechanismen, wurde die bestehende Kooperation mit dem EnCN Projekt ECONOMY stark intensiviert. So konnten mathematische Methoden entwickelt werden, um quantitative Aussagen zu Investitionen in Kraftwerke und Trassen im deutschen und anderen liberalisierten Strommärkten treffen zu können [47]. Zusätzlich konnten wichtige theoretische Erkenntnisse zur Kombination von Marktmechanismen mit linearen und auch nichtlinearen Energiefluss-Modellen gewonnen werden [45][46]. Eine weitere Arbeit über Verfahren zur Bestimmung optimaler Preiszonen für den deutschen und europäischen Strommarkt befindet sich gerade in der Fertigstellung.

Des Weiteren wurde im Rahmen des im Projektzeitraum beantragten und bewilligten Sonderforschungsbereichs/Transregios 154 ein Teilprojekt beantragt und im Oktober 2016 bewilligt, das sich mit theoretischen Fragen der mathematischen Modellierung von Gasmärkten beschäftigt. Durch dieses Projekt zur mathematischen Grundlagenforschung ist damit eine weitere exzellente Stütze zu den in der zweiten Phase des EnCN beantragten Projekten zur Gasmarktmodellierung geschaffen worden.

2.4 EWave

Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt Energiemanagementsystem Wasserversorgung, kurz EWave (Förderkennzeichen 02WER1323), verfolgt das Ziel, ein Werkzeug zur Betriebsführungsunterstützung von Wasserversorgungsbetrieben zu entwickeln. Ziel des Decision Support Systems ist es, dem Nutzer sowohl einen optimierten Fahrplan der einzelnen Anlagen und Prozesse als auch ein optimiertes Betriebsführungskonzept des gesamten Wasserversorgungssystems vorzuschlagen.

Mit dem Decision Support System EWave wird der Wirkungsgrad jedes einzelnen Schrittes der gesamten Prozesskette Gewinnung-Aufbereitung-Speicherung-Verteilung, teilweise bis auf die Aggregatebene der Hauptverbraucher (Förderpumpen), transparent. Damit wird die Verbesserung des Gesamtsystems sichergestellt und eine unter Kosten-/Nutzaspekten optimierte Investitionsstrategie erzielt. Die Ergebnisse des resultierenden optimierten und damit auch energieeffizienten Bedarfs können zusätzlich an den Energieversorger als Prognose rückgekoppelt werden. Mit diesen Ergebnissen kann dann die Energiewirtschaft wiederum eine Optimierung des Kraftwerkparks durchführen, so dass eine volkswirtschaftliche Optimierung, d.h. über die Systemgrenzen der Wasserwirtschaft hinaus, erzielt wird.

Die Partner der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in diesem Verbundprojekt sind neben der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, der Bilfinger GreyLogix GmbH und der Siemens AG das Fachgebiet Numerik Partieller Differentialgleichungen unter der Leitung von Prof. Dr. Jens Lang von der Technischen-Universität Darmstadt sowie Prof. Dr. Gerd Steinebach von der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und Prof. Dr. Oliver Kolb von der Universität Mannheim. Seitens der FAU sind der Lehrstuhl für Angewandte Mathematik 2 (AM2) unter der Leitung von Prof. Dr. Günter Leugering und der Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik (WiMa) unter der Leitung von Prof. Dr. Alexander Martin beteiligt. Die zur Verfügung stehenden Personalmittel wurden zur Finanzierung der wissenschaftlichen Projektmitarbeiter Dr. Antonio Morsi, Dr. Björn Geißler (beide WiMa) und Dipl.-Technomath. Maximilian Walther (AM2) verwendet.

Zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz bei gleichzeitiger Einhaltung vielseitiger Randbedingungen, die aus dem Qualitätsanspruch an das Lebensmittel Trinkwasser gepaart mit wasserrechtlichen, verfahrenstechnischen, betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Aspekten resultieren, wurde ein hoch-dimensionales Optimierungsmodell formuliert. Zur Lösung dieses

komplexen Optimierungsmodells wird an der FAU ein zweistufiger Ansatz angewendet und im Rahmen des EWave-Optimierungsmoduls EWave-OPT umgesetzt. Dieser zweistufige Ansatz wurde von den Projektmitarbeitern mitentwickelt und bereits erfolgreich im Kontext von Gastransportnetzen angewendet [55][57][58][63]. Durch einen Aufruf von EWave-OPT wird zunächst durch EWave-DOPT auf Basis aktueller Verbrauchsprognosen und einem durch die Simulation bereitgestellten Startzustand ein Vorschlag für die diskreten Steuerungsentscheidungen, wie Pumpenfahrwege und Schieberstellungen, sowie eine mit diesem Entscheidungsvorschlag einhergehende Prognose des Netzzustands berechnet. Auf Basis der durch EWave-DOPT berechneten diskreten Entscheidungen und Zustandsprognosen werden mit EWave-NOPT die exakten Betriebspunkte aller kontinuierlich steuerbaren Systemkomponenten, wie z.B. Regelventile oder drehzahlgeregelte Pumpen, optimiert und die zugehörige, physikalisch detaillierte Entwicklung aller relevanten Zustandsgrößen berechnet.

Bei EWave-DOPT handelt es sich um eine Software zur Optimierung des Betriebs von Wasserversorgungsnetzen auf Basis von eigens entwickelten Modellen und Methoden der gemischt-ganzzahligen Optimierung, wie in [64] (insbesondere [65][66]) sowie der Dissertation [67] beschrieben. Die Software EWave-NOPT basiert auf ANACONDA, das sowohl zur Simulation von Wasserversorgungsnetzen als auch zur kontinuierlich-nichtlinearen Optimierung der Betriebspunkte aller steuerbaren Netzkomponenten verwendet wird.

Die Berechnung eines auf diese Weise optimierten Vorschlags für eine energieeffiziente Steuerung eines Wasserversorgungssystems durch EWave-OPT erfolgt rollierend für einen festen Zeitraum, zum Beispiel alle 15 Minuten, für die nächsten 24 Stunden.

Erste Untersuchungen im Berichtszeitraum durch Simulationsvergleiche von mittels EWave-OPT optimierten Steuerentscheidungen und bisherigen Fahrweisen auf Basis historischer Messwerte für ein Wasserwerk des Projektpartners RWW zeigen ein Energieeinsparpotential von bis zu 15% auf. Zur effizienten Lösung großer Netze sollen in einem nächsten Schritt die der Projektmitarbeiter mitentwickelten Zerlegungsverfahren [42][43][52] weiterentwickelt und angewendet werden.

2.5 Preiseffekte von Speichern in Strommärkten mit zonaler Preissetzung

In den vergangenen Jahren wurden immer stärker die Effekte von Speichern auf Strompreise untersucht, wobei in diesem Kontext insbesondere die verringerte Preisvolatilität in Märkten mit Speichern im Fokus stand. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden erstmals die Effekte von Speichern auf Märkten mit einem zonalen Preissetzungssystem untersucht. Ein zonales Preissystem ist dabei durch einheitliche Preise innerhalb der ex-ante vorgegebenen Preiszonen charakterisiert, wobei sich die jeweiligen Zonenpreise aus einem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage ergeben.

Im beschriebenen Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass sich optimale Preiszonenkongfigurationen in Märkten ohne Speicher nicht unmittelbar auf Strommärkte mit Speichern übertragen lassen. Vielmehr können Speicher das Preisgefüge derart verändern, dass sich völlig neue, optimale Preiszonenzuschnitte ergeben. Für die beteiligten Marktakteure vermögen diese Zuschnitte unterschiedliche ökonomische Anreizeffekte auszulösen. Darüber hinaus können die eben beschriebenen suboptimalen Zonenkongfigurationen im Falle von Speichern zu ineffizienten Netzinvestitionen führen, wobei sowohl Über- als auch Unterinvestitionen eintreten können. Aus wirtschaftspolitischer Sicht sollten daher im Zuge eines immer stärkeren Ausbaus von Speichern sowohl Entscheidungen über eine Preiszonwahl als auch über einen Netzausbau durch eine detaillierte ökonomische Systemanalyse unter Berücksichtigung von Speichern quantitativ und qualitativ unterstützt werden.

2.6 Sonderforschungsbereich (SFB TRR 154) - Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzwerken

Die in Abschnitt 2.1 aufgeführten praxisorientierten methodischen Entwicklungen werden seit Oktober 2014 durch theoretische Arbeiten im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs/Transregios 154 (Sprecher: Prof. Dr. Alexander Martin, ebenfalls EnCN SIMULATION) ergänzt [41][51].

Durch die Fokussierung auf eine effiziente Gasversorgung ergeben sich eine Vielzahl von Problemen, sowohl in Bezug auf den Transport und die Netztechnik, als auch auf die Berücksichtigung marktregulatorischer Bedingungen und die Kopplung mit anderen Energieträgern. Exemplarisch sei hier genannt, dass Gastransporteure dafür Sorge tragen müssen, dass innerhalb technisch verfügbarer Kapazitäten alle am Markt abgeschlossenen Verträge bei Nutzung erfüllt werden können. Der TRR 154 hat sich zur Aufgabe gemacht, Antworten auf diese Herausforderungen mit Mitteln der mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung zu geben und damit Lösungen auf einem neuen Qualitätsstandard anzubieten. Um dies zu erreichen, sind innerhalb der Mathematik neue Erkenntnisse in unterschiedlichen Gebieten, wie der mathematischen Modellierung, der numerischen Analysis und Simulation sowie der ganzzahligen, kontinuierlichen und stochastischen Optimierung notwendig. Genannt seien hier exemplarisch die Modellierung und Analysis von komplexen Netzwerken hyperbolischer Bilanzgleichungen unter Berücksichtigung von

Schalten, die Entwicklung einer gemischt-ganzzahligen Optimierungstheorie und deren algorithmische Umsetzung für derartige Netzwerke und die effiziente hierarchische numerische Approximation der entstehenden, algebraisch gekoppelten PDEs inklusive Fehlersteuerung im Zusammenhang mit gemischt-ganzzahligen Optimierungsverfahren. Weitere mathematische Fragestellungen entstehen durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten. Die besondere Neuerung und das Alleinstellungsmerkmal des TRR 154 liegen in der fokussierten Integration dieser mathematischen Teilgebiete. Dazu zählen eine in sich konsistente Hierarchie von Modellen, eine Kopplung von Methoden der ganzzahligen und kontinuierlichen Optimierung, bis hin zur optimalen Steuerung von Systemen mit deterministischer oder stochastischer Unsicherheit. Die zu erzielenden mathematischen Erkenntnisse sind einerseits zwar motiviert durch das Beispiel von Gasnetzen, andererseits jedoch inhärent generalisierend und somit auf weitere Kontexte anwendbar. Dies betrifft beispielsweise sowohl andere physikalische Transportnetze, wie Wassernetze, als auch ganz allgemein die Entwicklung von Lösungsverfahren für gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierungsprobleme. Alle diese vorgestellten Fragestellungen werden im TRR 154 angegangen, indem auf der einen Seite mathematische Grundlagen für die Behandlung der in der Praxis auftretenden Fragestellungen erarbeitet und auf der anderen Seite die mathematische Theorie- und Methodenbildung vorangetrieben wird.

3 Simulationsbasierte Optimierung und Steuerung zur energieeffizienten Integration und Planung von Gebäuden und Siedlungen

Ziel dieses Teilprojekts war die Bereitstellung von Methoden zur effizienten Integration vorhandener Gebäude in Energieversorgungsnetze, bzw. zur Planung smarter Energienetze im Kontext der Planung von Gebäuden und Siedlungen. Hierzu wurden echtzeitfähige schaltende Simulations- und Optimierungsverfahren entwickelt bzw. vorhandene Verfahren mit Blick auf ein Gesamtmodell erweitert. Eine derartige Gesamtbetrachtungsweise war zum Zeitpunkt des Projektbeginns im Rahmen einer Modellierung, Simulation und Optimierung noch nicht erfolgt und ließ eine deutliche Verbesserung gegenüber der bislang durchgeführten dezentralen Herangehensweise, die zwar in sich stabile jedoch hochgradig redundante Lösung liefert, erwarten.

Mit den Fördermitteln für Personalkosten wurde Herr Dipl.-Wirtschaftsmath. Christoph Thurner zum 15.10.2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das Teilprojekt 3 auf einer halben Stelle eingestellt.

Im Projektverlauf wurde der Schwerpunkt von der Integration und Planung von Gebäuden und Siedlungen hinzu Optimierung und Steuerung von elektrischen Energiesystemen verallgemeinert. Dafür wurde ein Optimierungsmodell entwickelt, das verschiedene Komponenten des elektrischen Energiesystems umfasst. Dazu gehören Kraftwerke, erneuerbare Erzeuger wie PV oder Windkraftanlagen aber auch Speichern und kapazitätsbeschränkte Transportnetze.

Für die Modellierung ist ein gemischt-ganzzahliges Modell notwendig, um zum einen diskrete Ausbauentscheidungen treffen und zum anderen die technischen Restriktionen der Kraftwerke adäquat abbilden zu können. Dazu zählen u.a. Mindestproduktionsmengen sowie Mindeststillstands- und Mindestlaufzeiten, um thermische Stressbelastungen zu vermeiden. Diese Restriktionen sind im Speziellen für die Berücksichtigung der Systemflexibilität relevant. Des Weiteren können Teillastwirkungsgrade als nicht-lineare Funktionen modelliert werden.

Durch den modularen Aufbau können sowohl kleine Smart Grids, als auch große Energiesysteme wie z.B. das bayerische oder deutsche elektrische Energiesystem modelliert werden. Der skizzierte Modellansatz, sowie die im Folgenden beschriebenen algorithmischen Lösungen wurden unter anderem in dem gemeinsamen Projekt "Energiesystemanalyse Deutschland mit Schwerpunkt auf Bayern" erfolgreich angewendet [2][19][23][71]. Des Weiteren ist in diesem Rahmen eine Dissertation [70] am Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik entstanden.

Der Hauptfokus des Teilprojekts bestand in der Entwicklung von Algorithmen anhand derer die modellierten Instanzen effizient gelöst werden können. Dabei stellen vor allem die aus den technischen Restriktionen resultierenden kombinatorischen Nebenbedingungen Schwierigkeiten beim Lösen des Modells dar. Hinzu kommt die enorme Problemgröße aufgrund langer Planungszeiträume welche für die Auslegung von Energiesystemen notwendig sind.

Durch die Kombination von Dekompositions- und adaptiven Verfeinerungsmethoden ist es gelungen, die Komplexität und Größe des betrachteten Kapazitätsplanungsproblems zu reduzieren und somit Energiesysteme über einen langen Planungszeitraum analysieren zu können. Einerseits wurde ein Dekompositionsansatz verwendet anhand dessen Ausbau- und Steuerungsentscheidungen getrennt voneinander in einem Master- bzw. Subproblem getroffen werden können. In einem iterativen Prozess wird durch das Hinzufügen von Schnittebenen im Masterproblem die Abhängigkeit der Ausbauentscheidungen von der Einsatzplanung sichergestellt.

Da die Einsatzplanung für große Energiesysteme und lange Planungszeiträume immer noch zu komplex ist, um sie von einem Standard-Löser berechnen zu lassen, wurde in [70] ein Algorithmus basierend auf [68] entwickelt, der den Planungshorizont in Zeitphasen unterteilt und aggregiert abbildet. Zu Beginn wird mit einer Startaggregation eine Steuerung berechnet, die eine relaxierte Lösung des Originalproblems darstellt. In einem iterativen Vorgehen werden nun kritische Zeitphasen erkannt und adaptiv verfeinert. „Kritisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Restriktionen des Originalproblems verletzt sind, so dass aus der relaxierten Steuerung keine für das Originalproblem zulässige Steuerung generiert werden kann. Dabei wird unter anderem ausgenutzt, dass das gesamte System zwar zeitlich global voneinander abhängig ist, die Kopplungen über die Zeit jedoch nur sehr lose sind. Damit haben lokale Veränderungen in der Steuerung nur einen geringen Effekt auf hinreichend weit auseinanderliegende Perioden. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht u.a. darin, dass der globale Zusammenhang über den gesamten Zeitraum hin erhalten bleibt.

Des Weiteren wurde ein Verfahren aus der Robusten Optimierung entwickelt [69], um Unsicherheiten bzgl. der Einspeisung erneuerbarer Erzeuger adäquat im System abbilden zu können. Der in [69] beschriebene Modellansatz wurde in einer ersten Basisversion [70] weiterentwickelt, um die Vergrößerung des Systems durch die Robustifizierung zu reduzieren und das robuste Gegenstück effizient lösen zu können. Erste Testergebnisse sind vielversprechend. Im Weiteren sollen noch Implementierungsdetails die Effizienz weiter verbessern.

4 Virtuelle Gebäude im Kontext intelligenter Energieversorgungsnetze

Ziel dieses Teilprojekts war die Energiesimulation von Gebäuden in Abhängigkeit vom spezifischen Nutzerverhalten und den Versorgungsnetzen. In diesem gesamtheitlichen Ansatz birgt die systematische Optimierung ein besonders hohes Einsparpotential, da hier nicht nur ein isoliertes Gebäude als autonomes System optimiert werden sollte. Über diese etablierten Techniken hinausgehend sollte in diesem Teilprojekt der Energieverbrauch in Abhängigkeit von den Nutzercharakteristika und dem spezifischen Energiebedarf der Bewohner modelliert werden und gleichzeitig diese Simulation den Kontext der Energienetze und der Smart-Grid-Technologien mit modellieren. Damit zielt die Simulation nicht nur auf die Optimierung einzelner Gebäude sondern auf die Modellierung von Gebäudeensembles und Siedlungen, da sich hier besondere Einsparungsmöglichkeiten abzeichnen, wenn sich z.B. der Energiebedarf der Nutzer in den verschiedenen Gebäuden komplementär ergänzt oder sich unterschiedlicher Energiequellen in ihrem Einsatz ergänzen können. Der Schwerpunkt des Projekts lag dazu auf der Nutzung von regenerativen Energiequellen und dem effizienten Einsatz von Energiespeichertechniken. Darüber hinaus wurden mit Hilfe des Internets Techniken öffentlich zur Verfügung gestellt, sodass Architekten, Hersteller von Haustechnikkomponenten und Handwerksbetriebe die Optimierungsverfahren z.B. zur Bewertung von technischen Lösungen im Kontext der Integration in lokale Energienetze einsetzen können.

Das Teilprojekt 4 (TP4) wird von Herrn Prof. Dr. Rüde, Herrn Prof. Dr. German und Prof. Dr. Leugering koordiniert. Mit den Fördermitteln für Personalkosten wurde Herr Dipl.-Inf (FH) Christian Kuschel, M. Sc. (hons), als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das TP4 eingestellt.

Primär wurde die hochauflösende (zeitlich feingranular mit detaillierten Verbrauchermodellen) Simulation großer Energienetze verfolgt, um so Aussagen über Wirtschaftlichkeit und Robustheit der Netze, insbesondere durch Verwendung erneuerbarer Energien, treffen zu können. Die gesamte Simulation (starke Kopplung) ist das Resultat eines Kosten oder Energie minimierenden Optimierungsproblems, in dem das Angebot und die Nachfrage der Haushalte, aber auch die Netzstruktur explizit berücksichtigt werden. Dabei lassen sich die Haushalte und die Netzstruktur modular zusammensetzen, um Flexibilität der Simulationsmöglichkeiten zu gewährleisten. Durch die Modularität ist die Implementierung kann sie problemlos erweitert werden.

Die Verbraucher der Energienetze werden als Teil eines Optimierungsproblems durch Nebenbedingungen beschrieben. Diese beinhalten Solarzellen, Windkraftträder, Kraft-Wärme-Kopplung, Brennstoffzellen und Energiespeicher. Durch diese Geräte ist es möglich, dass Verbraucher nicht nur sich selbst, sondern auch andere Verbraucher versorgen. So agieren sie auch als Produzent, was eine dezentrale Energieproduktion ermöglicht.

Darüber hinaus sind auch intelligente Haushaltsgeräte, wie z.B. Kühlschränke und Waschmaschinen, sowie Heizung modelliert, um den besten Nutzen aus der Vernetzung der einzelnen Verbraucher und Geräte zu erhalten. Um die benötigte Energie zu bestimmen welche die Heizung erzeugen muss, um die Temperatur in einem „Wohlfühlintervall“ zu halten, wird mit einem thermodynamischen Modell gerechnet. Dieses ist so konzipiert, dass es sich auch wie die anderen Geräte als Nebenbedingungen in das mathematische Optimierungsproblem integrieren lässt.

Die Verbraucher werden aufgrund statistischer Erhebungen repräsentiert. So ist jeder Verbraucher durch ein Stromlastprofil gegeben, das seine Nachfrage bestimmt. Die Lastprofilgenerierung ist so konzipiert, dass im Mittel das Standardlastprofil des Strombetreibers entsteht, d.h. im Mittel wird eine authentische Nachfrage verwendet.

Zusätzlich zur Statistik der Strombetreiber werden auch Wetterdaten verwendet. Insbesondere ist die Sonneneinstrahlung pro Quadratmeter für Solar Panels und die Windgeschwindigkeit für Windkraftträder relevant. Außerdem ist die Außentemperatur auch eine wichtige Komponente. Denn sie beeinflusst sowohl wie viel in einem Gebäude geheizt werden muss, als auch wie viel Strom durch Solar Panels erzeugt wird.

Um die Netzstruktur abzubilden, werden die einzelnen Verbraucher als Knoten eines graphentheoretischen Netzwerks interpretiert, durch das der minimale Fluss, der alle Verbraucher mit ihrer Nachfrage beliefert bzw. Angebot abführt, berechnet wird.

Mit diesem Ansatz lassen sich detaillierte Verbraucher optimal unter Berücksichtigung von erneuerbaren Energien und der Netzstruktur und -kapazitäten simulieren.

Nachdem die Fördermittel erschöpft waren, wurde die Forschung außerhalb des EnCN weitergeführt. So wurde zusätzlich ein Marktmodell eingeführt, in dem sich die Energiepreise nach Angebot und Nachfrage der Verbraucher richten. Außerdem ist es beabsichtigt, große Energienetze zu simulieren, was mit einem Computer nicht mehr möglich ist. Daher wurde ein spieltheoretischer Ansatz (schwache Kopplung), der das Marktmodell beinhaltet, entwickelt und parallelisiert. Dadurch ist es möglich, Energienetze mit mehr als 30 Millionen Haushalten optimal zu simulieren. Dies führte zu zwei Veröffentlichungen und einem Konferenzbeitrag.

Durch die Weiterführung der Arbeit ist es möglich, Energienetze in der Größe von Ländern optimal zu simulieren. Durch die Simulation kann z.B. die Wirtschaftlichkeit von Netzausbau oder die Energiesicherheit eines Landes analysiert und potentiell verbessert werden.

5 Elektromobilität – Simulationsmethoden zur Bewertung und Validierung

Ziel dieses Teilprojekts war die Bereitstellung eines Simulationsmodells zur Mikrosimulation des Straßenverkehrs (d.h. mit Nachbildung einzelner Fahrzeuge) auf realen Straßennetzen erweitert um deren Kommunikationsmöglichkeiten sowie energetische Aspekte wie Batterien und Anschluss an elektrische Netze. Hierdurch können im Detail Szenarien zur Elektromobilität überprüft werden unter Verwendung sehr realistischer Fahrprofile. Als Zielgrößen können so z.B. Reichweiten und Batterielebensdauern für realistische Fahrprofile ermittelt werden.

Zu Beginn des Jahres 2013 wurde dazu Herr Rüdiger Berndt als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) aus Mitteln des Lehrstuhls eingestellt, um die Thematik des TP5 bis zum 30.06.2013 zu bearbeiten. Auf dieser Grundlage konnte das Verbundprojekt e-NUE (Kombinierte geschäftliche und private Nutzung von Elektrofahrzeugen in der Region Nürnberg) im Rahmen des bundesweiten Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ mit den Partnern Audi AG und N-ERGIE Aktiengesellschaft akquiriert werden [4]. Hier waren zwei Mitarbeiter am Lehrstuhl beschäftigt (Herr Rüdiger Berndt und zunächst Frau Ekaterina Masalkina, danach Herr Sebastian Schellenberg) und über das Bayerische Wirtschaftsministerium finanziert. Das Projekt hatte eine Laufzeit bis 31.12.2015.

Das e-NUE Projekt war in zwei Phasen gegliedert, in der ersten Phase (Juli 2012 – Juli 2014) wurden 5 Audi A1 e-tron von der N-ERGIE Aktiengesellschaft im kombiniert privaten und geschäftlichen Betrieb genutzt. In der zweiten Phase (September 2014 – September 2015) wurden 5 Audi A3 e-tron von kleinen und mittelständischen Betrieben in der Metropolregion Nürnberg, ebenfalls kombiniert privat und geschäftlich, genutzt. Während der A1 e-tron auf dem Konzept eines rein-elektrischen Fahrzeugs mit Range-Extender (basierend auf einem Wankelmotor) beruht, handelte es sich beim A3 e-tron um ein hybrides Modell (Otto- und Elektromotor wirken beide auf den Antriebsstrang).

Basierend auf Daten, die beim Einsatz der beiden Fahrzeugtypen während der zwei Phasen des Projekts erhoben wurden, wurde ein gekoppeltes Simulationsmodell für den Straßenverkehr und die Fahrzeugkommunikation unter Berücksichtigung von Eigenschaften der Batterie, der Verbrennungsmotoren, Ladezyklen, Reichweiten und der simulierten Infrastruktur [76] entwickelt. Das Ziel war die Ableitung technischer und wirtschaftlicher Ergebnisse für die Elektrifizierung geschäftlich genutzter Fahrzeugflotten, sowie die Untersuchung des Einflusses der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen untereinander als auch mit der Infrastruktur auf den Verbrauch [74][77]. In diesem Rahmen wurde der Einsatz des auf Straßenverkehr ausgelegten Mikrosimulators „SUMO“ und auch des ereignisgetriebenen Netzwerksimulators „OMNeT++“ untersucht und an der Entwicklung eines Batteriemodells und eines mit der Verkehrssimulation verbundenen Kinematikmodells gearbeitet.

Zusätzlich wurde ein Makrosimulator entwickelt, welcher es ermöglicht, lange Zeiträume zu simulieren und für verschiedene Parametrisierungen hinsichtlich der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und des Bedarfs an Dienstfahrten, Handlungsempfehlungen für die Elektrifizierung einer Fahrzeugflotte eines Unternehmens zu geben [75]. Exemplarisch wurde so für den Fuhrpark der N-ERGIE AG eine Analyse durchgeführt, welche ein Elektrifizierungspotential von 40 % der Flotte ergab. Aus der Simulation resultierte weiterhin ein Einsparpotential von bis zu 50 % der CO₂-Emissionen sowie fast 40 % der Kosten.

Im Projekt "Ausbau und regionale Verteilung der Ladeinfrastruktur in Bayern" wurde durch die Professur Energieinformatik im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie sowie in Kooperation mit der Bayern Innovativ GmbH ein ereignisdiskretes Simulationstool entwickelt. Mit dem entwickelten Simulationstool lassen sich Aussagen zur benötigten Anzahl und regionalen Verteilung öffentlich zugänglicher Ladesäulen auf Landkreisebene bis zum Jahr 2020 tätigen. Dabei stützt sich das Simulationsmodell grundsätzlich auf empirisch erfasste Daten, die über die Firma Cirrantic GmbH zu Beginn des Projekts beschafft wurden.

Im EU-Projekt „European Green Corridors“ wurde das im Rahmen der Energiesystemanalyse entwickelte Simulationsmodell eingesetzt, um Auswirkungen einer zunehmenden Elektromobilität auf das elektrische Energieversorgungssystem in den Jahren 2020 und 2030 zu analysieren. Hierbei wurden Durchdringungen mit Batterie-, Plug-in-Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen und zugehörigen Ladeprofilen angenommen. Als wesentliche Ausgabemaße wurden die Veränderung von CO₂-Emissionen in den Sektoren Verkehr und Elektrizität ermittelt.

Außerdem wird im Rahmen eines Forschungsprojekts am Lehrstuhl Informatik 7 die Integration von Elektrofahrzeugen in das elektrische Energieversorgungssystem mittels eines dezentral organisierten Vehicle-to-Building (V2B) Ansatzes untersucht. Weiterhin wurden in 2016 Themen der Elektromobilität am Lehrstuhl unter dem Oberbegriff ‚vernetzte Mobilität‘ zusammengefasst und in die gleichnamige ZD.B.-Themenplattform integriert.

6 Verknüpfung von Energiemodellen

Während in den Teilprojekten 2 und 3 bei der Optimierung der planerische Aspekt, und damit die kombinatorischen Entscheidungen, im Vordergrund stehen und bei den Teilprojekten 1, 4 und 5 der simulationsbasierte Ansatz, und damit die physikalischen Eigenschaften, im Fokus sind, ist dieses TP in dem in der Einleitung auf Seite 2 spezifizierten Sinne auf der Mesoebene angesiedelt. Ziel wird es sein, die durch die Verknüpfung der Makro- mit der Mikrobene entstehenden mathematischen Modelle und Strukturen zu untersuchen und so bereitzustellen, dass effiziente Lösungen mit Gütegarantien erzielt werden können. Die Kopplung entscheidungsbasierter und physikalischer Aspekte, wie Sie in den hier zu behandelnden Energieproblemen auftreten, sind zurzeit hochaktuelles Forschungsgebiet und bislang nicht untersucht. Nur durch die einmalige Konstellation, dass alle relevanten Wissenschaftsdisziplinen (Mathematik, Informatik, Ingenieurwissenschaften) im EnCN zusammengeführt werden, ist eine Lösung derart komplexer Fragestellungen möglich.

Nachdem vor dem Hintergrund der Entwicklung in den anderen Teilprojekten und mit Blick auf die zu besetzende Juniorprofessur, auf die im 1. Halbjahr 2014 Herr Jun.-Prof. Dr. Martin Schmidt berufen wurde, TP6 zunächst zurückgestellt wurde, ergab sich eine Änderung des Themas dahingehend, dass fortan die Verknüpfung von linearen und nichtlinearen Modellen anhand von linearen Approximationsverfahren im Fokus steht. Zu Beginn des Jahres 2014 wurde Herr Dipl.-Math. Maximilian Merkert als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik für das Teilprojekt auf einer halben Stelle eingestellt. Außerdem übergab Herr Prof. Leugering, der TP6 bis dahin betreut hat, die Hauptverantwortung an Herrn Prof. Martin.

Im bisherigen Projektverlauf wurden daraufhin u.a. stückweise linearisierte Flussprobleme betrachtet. Wie in den letzten Jahresberichten beschrieben, ergeben sich diese beispielsweise in Zusammenhang mit nichtlinearen Zusammenhängen auf Transportnetzen für Energieträger, wobei man hier insbesondere Nichtlinearitäten im Blick hat, die typischerweise aufgrund physikalischer Gesetze auftreten und sehr lokale Kopplungsbedingungen auf dem Netzwerk darstellen. Ein Beispiel hierfür ist der Druckabfall in Rohren in Gasnetzwerken. Eine etablierte und vielversprechende Möglichkeit, mit Nichtlinearitäten dieser Art umzugehen besteht darin, sie stückweise linear zu approximieren bzw. zu relaxieren. Dadurch können auch nichtlineare Optimierungsprobleme den Lösungsmethoden der ganzzahligen linearen Optimierung zugänglich gemacht werden.

Zu den Ergebnissen wurde bereits 2015 ein Preprint fertiggestellt; außerdem wurden sie seitdem auf mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt. Neben theoretischen Resultaten wurde auch in experimentellen Rechnungen gezeigt, dass durch den Einsatz der gefundenen Schnittebenen die Effizienz eines führenden MIP-Lösers auf Beispielinstanzen deutlich verbessert wird. Aufbauend auf theoretischen Überlegungen aus dem Jahr 2015 konnten nun ähnliche Resultate auch für Modelle basierend auf der sog. „inkrementellen Methode“ erzielt werden, der insbesondere in der Gasnetzoptimierung eine hohe praktische Relevanz zukommt. Die Ergebnisse sind im Rahmen einer Revision in den genannten Artikel eingeflossen und dieser wurde im Oktober 2016 zur Veröffentlichung angenommen [80].

Weiterhin wurden strukturelle Ähnlichkeiten zwischen stückweise linearisierten Flussproblemen und einem weiteren Anwendungsproblem aus dem Bereich Energieoptimierung festgestellt. Bei diesem geht es um die Anpassung von Fahrplänen im Zugverkehr mit dem Ziel der Minimierung von Energiespitzen. Zur Erfassung und Verallgemeinerung der wesentlichen Gemeinsamkeiten der beiden Probleme auf abstrakter Ebene wurde die Definition der „Staircase Compatibility“ entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass ähnliche Schnittebenen wie in [80] vollständige Beschreibungen des zugrundeliegenden Polytops ergeben, die zudem total unimodular sind. Entsprechende Reformulierungen konnten auch in der Energiespitzenminimierung die Lösungszeit

großer Instanzen erheblich reduzieren. Zu den Resultaten wurde ein Artikel zur Veröffentlichung eingereicht [81]. Außerdem wurde das Konzept auf einer weiteren internationalen Fachkonferenz vorgestellt.

In Zusammenhang mit der Methodik der iterativen Aggregation [68] wurde die Frage betrachtet, wie klein die theoretisch beste Netzwerkaggregation sein kann, d.h., welche Vergrößerung eines gegebenen Netzwerks immer noch ausreichend ist, um auf die gleiche Optimallösung zu führen wie das Gesamtnetz. Dies würde eine Einschätzung erlauben, wie gut die Disaggregationsstrategie des im Projekt entwickelten Algorithmus ist und, entsprechend, wie viel Verbesserungspotential besteht. Es wurde eine Bachelorarbeit betreut, in der die Frage für den einfacheren linearen Fall beantwortet wurde. Diese kam zum Ergebnis, dass Einsparungen im moderaten Bereich möglich sind. Für den Fall ganzzahliger Ausbauentscheidungen führt das Problem der optimalen Graphaggregation auf deutlich schwerer zu lösende Bilevel-Probleme. Hier gibt es Ansätze, die in künftigen Projekten Ausgangspunkt für neue Verfahren zur Lösung derartiger Probleme sein könnten.

Außerdem wurde die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der TU Dortmund sowie der ETH Zürich zu simultanen Konvexifizierungen weitergeführt. Die Grundidee besteht wie in [80] darin, Substrukturen aus mehreren Netzwerkelementen als Ganzes zu erfassen und so zu verstärkten Formulierungen zu gelangen. Es wurden einige theoretische Erkenntnisse gewonnen; so kann eine kürzlich von Kooperationspartnern entwickelte Methode zur Approximation quadratischer Gleichungen auf Substrukturen in Gasnetzwerken anwendbar gemacht werden. Teile der theoretischen Ideen wurden bereits an kleinen Netzwerken getestet, sind aber gängigen NLP-Lösern bisher noch unterlegen. Allerdings sind wesentliche Möglichkeiten für algorithmische Verbesserungen noch nicht ausgeschöpft; das Projekt erscheint weiterhin vielversprechend.

7 Schlussworte

Das Projekt SIMULATION konnte in der ersten Phase des EnCN neue wissenschaftliche Methoden zur Simulation und Optimierung von komplexen Energiesystemen erforschen, wie u.a. den Einsatz mehrstufiger Optimierung und das komponentenbasierte Schnittstellenkonzept für die hybride Simulation. Diese neuartigen Methoden wurden in Werkzeugen umgesetzt (u.a. in dem Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy und der Open-Source-Simulationsumgebung SGsim) und im Rahmen von mehreren eingeworbenen Drittmittelprojekten praktisch eingesetzt. Hierzu gehören: Energiesystemanalyse Bayern, Optimierung von Gastransportnetzwerken, Simulation des virtuellen Batteriespeichers im Projekt SWARM, Simulation und Optimierung von Zementwerken mit erneuerbaren Energieträgern, kombinierte Betrachtung von Smart Grids und Marktmechanismen sowie Untersuchungen zur Elektromobilität. Während der Laufzeit wurden die beiden im Rahmen des EnCN eingerichteten Nachwuchsprofessuren „Optimierung von Energiesystemen“ und „Energieinformatik“ besetzt, sie können auf den international sichtbaren Vorarbeiten aufsetzen und diese Themen weiterentwickeln. Daneben wurde durch neue Lehrveranstaltungen, Abschlussarbeiten, begonnene und bereits abgeschlossene Dissertationen inhaltlich und personell die Grundlage für zukünftige Arbeiten auf diesem Feld gelegt. Hierbei ist insbesondere das Verbundprojekt „Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems Deutschlands im europäischen Kontext (KOSiNeK) im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms des BMWi von Bedeutung, in dem die Arbeit zur Energiesystemanalyse Bayern im europäischen Kontext unter der Leitung von Prof. German weitergeführt wird. Der SFB/Transregio 154 zur Simulation und Optimierung von Gastransportnetzen unter Leitung von Prof. Martin besitzt eine Leuchtturmfunktion und sorgt für weitere Jahre der Dynamik in diesem Feld. In der zweiten Phase des EnCN sollen die Arbeiten u.a. in den Projekten „Speicher“ und „Energiemarktdesign“ weiterentwickelt werden.

8 Veröffentlichungen

- [1] Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy (www7.cs.fau.de/energy)
- [2] Projekt Energiesystemanalyse Bayern (www.bayern-innovativ.de/cluster-energietechnik/systemanalyse_bayern)
- [3] Projekt Smart Grid Solar in Kooperation mit ZAE Bayern und verschiedenen Partnern (www.zae-bayern.de/hauptforschungsthemen/photovoltaik/projekte/smart-grid-solar.html)
- [4] Projekt e-NUE mit AUDI AG und N-ERGIE AG gefördert durch das BayStMWiVT im Rahmen des Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ (www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/kombinierte-geschaefentliche-und-private-nutzung-von-elektrofahrzeugen-in-der-region-n-rnberg.html)
- [5] Peter Bazan, Reinhard German: "Hybrid Simulation of Renewable Energy Generation and Storage Grids." In: Laroque, C.; Himmelsbach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. M. (Ed.): Proc. of the 2012 Winter Simulation Conference, Berlin, Dec. 2012.
- [6] Peter Bazan, Reinhard German: "Hybride Simulation eines Hauses mit Photovoltaikanlage und Batteriespeicher." 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Bad Staffelstein, March 2013.

- [7] Peter Bazan, Reinhard German: "Hybrid Simulation Framework for Renewable Energy Generation and Storage Grids." Proceedings of the International Workshop on Demand Modeling and Quantitative Analysis of Future Generation Energy Networks and Energy Efficient Systems (FGENET 2014), Bamberg, Germany, March 2014.
- [8] Abdalkarim Awad, Peter Bazan, Reinhard German: "Abstract-Based Methodology for Modeling and Simulation of Smart Grid Components." Proc. of the UKSim 6th European Symp. on Computer Modeling and Simulation, EMS 2012, Malta, Nov. 2012.
- [9] Abdalkarim Awad, Peter, Bazan, Reinhard German: "Exploiting Day-Ahead Electricity Price for Maximized Profit of Photovoltaic Systems." IEEE Int. Conf. on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP 2012), Nuremberg, Germany, Dec. 2012.
- [10] Abdalkarim Awad, Reinhard German: "Self-Organizing Smart Grid Services." Int. Wshp. on Technologies and Applications for Smart Cities (I-TASC), Proc. of 6th Int. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, NGMAST 2012, Paris, Sept. 2012.
- [11] Marco Pruckner, Abdalkarim Awad, Reinhard German: "A Study on the Impact of Packet Loss and Latency on Real-Time Demand Response in Smart Grid." Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2012), IEEE Wshp. on Smart Grid Communications: Design for Performance (SGComm 2012), Anaheim, California, USA, Dec. 2012.
- [12] Abdalkarim Awad, Peter Bazan, Reinhard German: "Profit Enhancement through Optimized Operation of Photovoltaic Systems with Elastic Demand." Proceedings of the IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference 2013 (IEEE PES APPEEC 2013), Hong Kong, December, 2013.
- [13] Abdalkarim Awad, Marco Pruckner, Peter Bazan, Reinhard German: "On the Profit Enhancement and State Estimation Services in the Smart Grid." Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2014), Washington, DC, February, 2014.
- [14] Marco Pruckner, Peter Bazan, Reinhard, German: "Towards a simulation model of the Bavarian electrical energy system." INFORMATIK 2012, Smart Grid Wshp., Braunschweig, Sept. 2012.
- [15] Marco Pruckner, Peter Bazan, Reinhard, German: "An Approach of a Simulation Model to Analyze the Future Energy Balance of Bavaria." Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies, (SG-TEP 2012), Nuremberg, Germany, December, 2012.
- [16] Klaus Hassmann, Marco Pruckner, Reinhard German: "Ratgeber und Werkzeug zur Steuerung der Energiewende." BWK Das Energiefachmagazin, Springer VDI-Verlag, Bd. 65 (2013) Nr. 1/2, S. 2-9.
- [17] Marco Pruckner, R. German: "A Simulation Model to Analyze the Residual Load During the Extension of Highly Fluctuating Renewables in Bavaria, Germany." IEEE Int. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG-2013, May 2013, Istanbul, Turkey.
- [18] Marco Pruckner, Reinhard German: "A Hybrid Simulation Model For Large-Scaled Electricity Generation Systems." Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, Dec. 2013.
- [19] Marco Pruckner, Christoph Thurner, Alexander Martin, Reinhard German: "A Coupled Optimization and Simulation Model for the Energy Transition in Bavaria." Proceedings of the International Workshop on Demand Modeling and Quantitative Analysis of Future Generation Energy Networks and Energy Efficient Systems (FGENET 2014), Bamberg, Germany, March 2014.
- [20] Marco Pruckner, Gaby Seifert, Matthias Luther, Reinhard German: "Gekoppeltes Energiesystemmodell für den Energieumstieg in Bayern." 13. Symposium Energieinnovation, 12.-14. Februar 2014, Graz (Österreich).
- [21] K. Hassmann, M. Pruckner, R. German: Simulationsmodell – Einfluss Kraft-Wärme-Kopplung. Bayern Innovativ, Cluster Energietechnik, Projektnews Energiesystemanalyse Bayern, Ausgabe 1, April 2013.
- [22] K. Hassmann, M. Pruckner, R. German: Simulationsmodell – Die Grenzen von Strom aus Sonne, Wind und Wasser ausloten. Bayern Innovativ, Cluster Energietechnik, Projektnews Energiesystemanalyse Bayern, Ausgabe 2, Juni 2013.
- [23] C. Thurner, A. Martin, K. Hassmann: Optimierungsmodell – Optimale Kapazitätsplanung unter Kostengesichtspunkten. Bayern Innovativ, Cluster Energietechnik, Projektnews Energiesystemanalyse Bayern, Ausgabe 3, August 2013.
- [24] M. Pruckner, R. German, K. Hassmann: Simulationsmodell – Die Thüringer Strombrücke – Auswirkungen auf das Bayerische Energiesystem. Bayern Innovativ, Cluster Energietechnik, Projektnews Energiesystemanalyse Bayern, Ausgabe 4, Oktober 2013.
- [25] Philipp Luchscheider, Peter Bazan, Reinhard German: "Zeitlich hochaufgelöste Simulation von Solarstrahlung zur Bewertung von Smart Grids." 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Bad Staffelstein, March 2014.
- [26] Marco Pruckner, Reinhard German: "Modeling and Simulation of Electricity Generated by Renewable Energy Sources for Complex Energy Systems". Proceedings of the Annual Simulation Symposium 2014. Spring Simulation Multi Conference (SpringSim 2014). (Tampa, USA; April 13-16, 2014). t
- [27] Ibrahim Alagöz, Christoffer Löffler, Vitali Schneider, Reinhard German. Simulating the Energy Management on Smartphones using Hybrid Modeling Techniques. 17th International GI/ITG Conference on "Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems" and "Dependability and Fault-Tolerance", Bamberg, March 2014.

- [28] David Steber, Peter Bazan und Reinhard German. SWARM - Increasing Household's Internal PV Consumption and Offering Primary Control Power with Distributed Batteries. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Karlsruhe, Germany, November 2015
- [29] M. Pruckner. Ein Simulationsmodell für den Energieumstieg in Bayern. ISBN: 978-3-7369-9097-5, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2015.
- [30] P. Bazan; D. Steber; M. Pruckner; R. German. Hierarchical Simulation of the German Energy System and Houses with PV and Storage Systems. 4. D-A-CH Energieinformatik Conference, Karlsruhe, November 2015.
- [31] A. Awad, S. Moarrab, R. German. QoS Implementation Inside LTE Networks to Support Time-Critical Smart Grid Applications. Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, Juni 2015.
- [32] A. Awad; P. Bazan; R. German. Privacy Aware Demand Response and Smart Metering. Proceedings of the IEEE 81st Vehicular Technology Conference: VTC2015-Spring, First International Workshop on Integrating Communications, Control, Computing Technologies for Smart Grid (ICT4SG), Glasgow, Scotland, Mai 2015
- [33] P. Bazan; P. Luchscheider; R. German. Rapid Modeling and Simulation of Hybrid Energy Networks. SmartER Europe 2015, Smart Energy Research at the crossroads of Engineering, Economics and Computer Science, Essen, Februar 2015.
- [34] David Steber, Peter Bazan und Reinhard German, "SWARM - Primärregelleistungserbringung mit verteilten Batteriespeichern in Haushalten," 14. Symposium Energieinnovation 2016, Graz, Österreich, 2016.
- [35] Abdalkarim Awad, Peter Bazan und Reinhard German, "SGsim: Co-Simulation Framework for ICT-Enabled Power Distribution Grids," 18th International GI/ITG Conference on Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems and Dependability and Fault-Tolerance (MMB & DFT 2016), Münster, Germany, pp. 5-8, April 2016.
- [36] Claudia Leepa, Annika Kufner, Simon Mehl, David Steber, Kishan Veerashekar, Ingo Sigert, Kornelia Götz, Reinhard German, Veronika Grimm und Matthias Luther, "SWARM - Successful Provision of Frequency Containment Reserve with Distributed Energy Storage Systems," 10th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2016), Duesseldorf, Germany, März 2016.
- [37] Abdalkarim Awad, Peter Bazan und Reinhard German, "Optimized Operation of PV/T and Micro-CHP Hybrid Power Systems," in Springer Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy Bd. 1 (1), pp. 1-14, 2016.
- [38] David Steber, Peter Bazan und Reinhard German, "SWARM - Strategies for Providing Primary Control Power with Distributed Battery Storage Systems," IEEE Energycon 2016, Leuven, Belgium, 2016.
- [39] Marco Pruckner und Reinhard German, "The Impact of Electric Vehicles on the German Energy System," Proceedings of the 48th Annual Simulation Symposium (ANSS '16), Pasadena (USA), 2016.
- [40] Bazan, P.; Steber, D. und German, R.: Hybrid simulation and energy market based optimization of cement plants Computer Science - Research and Development, Springer, 2016, Seiten 1-13.
- [41] Martin Gugat, Günter Leugering, Alexander Martin, Martin Schmidt, Mathias Sirvent, David Wintergerst. Towards Simulation Based Mixed-Integer Optimization with Differential Equations. 6/2016. Preprint: Online verfügbar bei Optimization Online.
- [42] Björn Geißler, Antonio Morsi, Lars Schewe, Martin Schmidt. Solving Highly Detailed Gas Transport MINLPs: Block Separability and Penalty Alternating Direction Methods. 6/2016. Preprint: Online verfügbar bei Optimization Online.
- [43] Björn Geißler, Antonio Morsi, Lars Schewe, Martin Schmidt. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. 4/2016. Eingereicht. Preprint: Online verfügbar bei Optimization Online.
- [44] Jesco Humpola, Imke Joormann, Djamal Oucherif, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe, Martin Schmidt, Robert Schwarz. GasLib - A Library of Gas Network Instances. Technical Report. 11/2015. Preprint: Online verfügbar bei Optimization Online.
- [45] Veronika Grimm, Lars Schewe, Martin Schmidt, Gregor Zöttl. Peak-Load Pricing on a Network. 5/2016. Submitted. Preprint: Online verfügbar bei Optimization Online.
- [46] Lars Schewe, Martin Schmidt. The Impact of Physics on Pricing in Energy Networks. 7/2015. Preprint: Online verfügbar bei SSRN.
- [47] Veronika Grimm, Alexander Martin, Martin Schmidt, Martin Weibelzahl, Gregor Zöttl. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. In: European Journal of Operational Research. Volume 254, Issue 2, 2016, pages 493-509. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.03.044.
- [48] Veronika Grimm, Alexander Martin, Martin Weibelzahl, Gregor Zöttl. On the long run effects of market splitting: Why more price zones might decrease welfare. Energy Policy. 94. 2016. S. 453 - 467. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.11.010.
- [49] Daniel Rose, Marc C. Steinbach, Martin Schmidt, Bernhard M. Willert. Computational optimization of gas compressor stations: MINLP models versus continuous reformulations. Mathematical Methods of Operations Research, 2016, Volume 83, Number 3, Pages 409 - 444. DOI: 10.1007/s00186-016-0533-5.
- [50] Martin Schmidt, Marc C. Steinbach, Bernhard M. Willert. High Detail Stationary Optimization Models for Gas Networks: Validation and Results. In: Optimization and Engineering, 17(2). 2016. DOI: 10.1007/s11081-015-9300-3. pages 437-472.
- [51] Pia Domschke, Martin Groß, Falk Hante, Benjamin Hiller, Lars Schewe, Martin Schmidt. Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung von Gastransportnetzwerken. In: gwf-Gas|Erdgas, 11/2015. Vol. 156, Nr. 11, pages 880-885.
- [52] Björn Geißler, Antonio Morsi, Lars Schewe, Martin Schmidt. Solving power-constrained gas transportation problems using an MIP-based alternating direction method. In Computers & Chemical Engineering, 2015, Vol. 82, pages 303-317. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.07.005.

- [53] Martin Schmidt. An Interior-Point Method for Nonlinear Optimization Problems with Locatable and Separable Nonsmoothness. In *EURO Journal on Computational Optimization*, 2015, Volume 3, Number 4, pages 309-348. DOI: 10.1007/s13675-015-0039-6.
- [54] Martin Schmidt, Marc C. Steinbach, Bernhard M. Willert. High detail stationary optimization models for gas networks. In: *Optimization and Engineering*, Volume 16, Number 1, 2015, pages 131-164. DOI: 10.1007/s11081-014-9246-x.
- [55] M. E. Pfetsch, A. Fügenschuh, B. Geißler, N. Geißler, R. Gollmer, B. Hiller, J. Humpola, Th. Koch, Th. Lehmann, A. Martin, A. Morsi, J. Rövekamp, L. Schewe, M. Schmidt, R. Schultz, R. Schwarz, J. Schweiger, C. Stangl, M. C. Steinbach, S. Vigerske and B. M. Willert. Validation of Nominations in Gas Network Optimization: Models, Methods, and Solutions. In: *Optimization Methods and Software*, Volume 30, Number 1, pp. 15-53, 2015, DOI: 10.1080/10556788.2014.888426.
- [56] Armin Fügenschuh, Björn Geißler, Ralf Gollmer, Christine Hayn, René Henrion, Benjamin Hiller, Jesco Humpola, Thorsten Koch, Thomas Lehmann, Alexander Martin, Radoslava Mirkov, Antonio Morsi, Jessica Rövekamp, Lars Schewe, Martin Schmidt, Rüdiger Schultz, Robert Schwarz, Jonas Schweiger, Claudia Stangl, Marc C. Steinbach and Bernhard M. Willert. Mathematical optimization for challenging network planning problems in unbundled liberalized gas markets. In: *Energy Systems*, Volume 5, Issue 3, pp. 449-473, September 2014, DOI: 10.1007/s12667-013-0099-8.
- [57] Lars Schewe, Thorsten Koch, Alexander Martin, und Marc E. Pfetsch. Mathematical Optimization for evaluating gas network capacities. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch5.
- [58] Björn Geißler, Alexander Martin, Antonio Morsi und Lars Schewe. The MILP-relaxation approach. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch6.
- [59] Armin Fügenschuh, Björn Geißler, Ralf Gollmer, Antonio Morsi, Marc E. Pfetsch, Jessica Rövekamp, Klaus Spreckelsen Martin Schmidt, Marc C. Steinbach. Physical and technical fundamentals of gas networks. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch2.
- [60] Martin Schmidt, Marc C. Steinbach, Bernhard M. Willert. An MPEC based heuristic. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch9.
- [61] Martin Schmidt, Marc C. Steinbach, Bernhard M. Willert. The precise NLP model. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch10.
- [62] Imke Joormann, Martin Schmidt, Marc C. Steinbach, Bernhard M. Willert. What does "feasible" mean?. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch11.
- [63] Benjamin Hiller, Jesco Humpola, Thomas Lehmann, Ralf Lenz, Antonio Morsi, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe, Martin Schmidt, Robert Schwarz, Jonas Schweiger, Claudia Stangl, Bernhard M. Willert. Computational results for validation of nominations. In: Thorsten Koch, Benjamin Hiller, Marc E. Pfetsch, Lars Schewe (Eds.), *Evaluating Gas Network Capacities*. MOS-SIAM Series on Optimization. 3/2015. ISBN 978-1-611973-68-6. DOI 10.1137/1.9781611973693.ch12.
- [64] Alexander Martin, Kathrin Klamroth, Jens Lang, Günter Leugering, Antonio Morsi, Martin Oberlack, Manfred Ostrowski, Roland Rosen (Eds). *Mathematical Optimization of Water Networks*. Vol. 162 of International Series of Numerical Mathematics, Springer Basel, 2012.
- [65] Antonio Morsi, Björn Geißler, Alexander Martin. Mixed Integer Optimization of Water Supply Networks. In Alexander Martin, Kathrin Klamroth, Jens Lang, Günter Leugering, Antonio Morsi, Martin Oberlack, Manfred Ostrowski, Roland Rosen (Eds), *Mathematical Optimization of Water Networks*, Vol. 162 of International Series of Numerical Mathematics, Springer Basel, 2012.
- [66] Oliver Kolb, Antonio Morsi, Jens Lang, Alexander Martin. Nonlinear and Mixed Integer Linear Programming. In Alexander Martin, Kathrin Klamroth, Jens Lang, Günter Leugering, Antonio Morsi, Martin Oberlack, Manfred Ostrowski, Roland Rosen (Eds), *Mathematical Optimization of Water Networks*, Vol. 162 of International Series of Numerical Mathematics, Springer Basel, 2012.
- [67] Antonio Morsi. *Solving MINLPs on Loosely-Coupled Networks with Applications in Water and Gas Network Optimization*. Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [68] A. Bärmann, F. Liers, A. Martin, M. Merkert, C. Thurner, D. Weninger. Solving Network Design Problems via Iterative Aggregation. *Mathematical Programming Computation*, 7(2), S. 189-217, 2015
- [69] A. Bärmann, A. Heidt, A. Martin, S. Pokutta, C. Thurner. Polyhedral Approximation of Ellipsoidal Uncertainty Sets via Extended Formulations - a computational case study. *Computational Management Science*, S. 1-43, 2015
- [70] C. Thurner. *Optimal Capacity Planning for the Transition of Energy Systems: Models, Methods and Solutions*, Eingereichte Dissertation, Verteidigung am 29.11.2016, FAU Erlangen Nürnberg, Erlangen, 2016

- [71] K.Hassmann, M. Pruckner, G. Seifert, C. Thurner. Energiesystemanalyse Bayern - Modellgestützte Analyse und Bewertung unterschiedlicher Szenarien für den Energieumstieg in Bayern. Bayerns Innovativ, Cluster Energietechnik, Projektnews Energiesystemanalyse Bayern, Abschlussbericht, Jul 2016
- [72] Ekaterina Masalkina, David Eckhoff, Rüdiger Berndt, Reinhard German: "Towards the City-scale Simulation and Performance Assessment of Electric Vehicles." 2nd GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication, Luxembourg City, Luxembourg February 2014.
- [73] Sebastian Schellenberg, Rüdiger Berndt, David Eckhoff und Reinhard German, "A Computationally Inexpensive Battery Model for the Microscopic Simulation of Electric Vehicles," 80th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2014-Fall), Vancouver, BC, Canada, pp. 1-6, September 2014.
- [74] S. Schellenberg; R. Berndt; D. Eckhoff; R. German. How Electric Vehicles Can Benefit from Vehicular Networking. 3rd GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication (FG-IVC 2015). Ulm, Deutschland, März 2015.
- [75] R. Berndt; S. Schellenberg; D. Eckhoff; R. German. A Lightweight Simulation Framework for the Analysis of Electrified Vehicle Fleets. 81th IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC 2015-Spring). Glasgow, Schottland, Mai 2015.
- [76] C. Bewermeyer; R. Berndt; S. Schellenberg; R. German; D. Eckhoff. Poster: cOSMetic - Towards Reliable OSM to SUMO Network Conversion. 7th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2015). Kyoto, Japan, Dezember 2015.
- [77] R.Berndt; S. Schellenberg; D. Eckhoff; R. German. Modeling IVC-based Energy Savings of Electric Vehicles. 7th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2015). Kyoto, Japan, Dezember 2015.
- [78] Rüdiger Berndt, "Decision Diagrams for the Verification of Consistency in Automotive Product Data," FAU, Erlangen, pp. 134, Diss., 2016.
- [79] Lorenz Ammon, Bernd Huber, Florian Hübler, Rüdiger Berndt, Sebastian Schellenberg und Vitali Schneider, "An Energy Demand Model for the Microscopic Simulation of Plug-In-Hybrid Vehicles," Proceedings of the 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC 2016), Michigan, Juni 2016.
- [80] Frauke Liers, Maximilian Merkert. Structural Investigation of Piecewise Linearized Network Flow Problems. SIAM Journal on Optimization, Volume 26, Issue 4, S. 2863–2886, 2016.
- [81] Andreas Bärmann, Thorsten Gellermann, Maximilian Merkert, Oskar Schneider. Staircase Compatibility and its Applications in Scheduling and Piecewise Linearization. Technischer Bericht (eingereicht), 2016, Online verfügbar unter http://www.mso.math.fau.de/fileadmin/wima/publications/Baermann_Gellermann_Merkert_Schneider-Staircase_Compatibility.pdf

DESIGN

BETEILIGTE GRUPPEN

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Fakultät Design

Fakultät Informatik

Projektbericht EnCN1

DESIGN – kooperative Forschung der Fakultäten Design und Informatik

DESIGN hat die Basis für eine neue Sicht auf Gebäude und das Gebäudemanagement (TFM) geschaffen. Augmented Reality (AR) zeigt Gebäude und deren funktionale Bestandteile – ausgehend von 3D-Daten, die autonom aus Video- oder Einzelbildern berechnet werden.

In der Energiekette wirkt DESIGN damit an mehreren Stellen: Als kommunikative Brücke zwischen komplexen TFM-Systemen und Gebäudenutzern und -besitzern. Dieselbe Technologie erlaubt parallel die Erfassung und Prüfung von PV-Anlagen sowie die Erfassung und Gebäudeteilen (zum Beispiel zur Vorbereitung von Modernisierungs- oder Erneuerungsarbeiten).

Ziel der weiteren Forschung ist die Übersetzung der Grundlagenarbeit in ein vollintegriertes System für die Erfassung und Darstellung von Gebäuden und deren technisch-energetisch Bauteile. Bis Ende 2016 basieren die Arbeiten noch auf mehreren getrennten Einheiten wie Autonome Flugroboter (Quadrocopter), Bildanalyse-Rechner sowie Mincomputer (Tablet) für die AR-Darstellung.

1 Visualisierung/Prototyp einer alternativen Ladestation

1.1 Entwurf/Visualisierung einer kontaktlosen Ladestation für E-Fahrzeuge

Eine kontaktlose Ladestation mit großer Positionstoleranz könnte den schleppenden Ausbau der Elektromobilität erheblich beschleunigen. In der Forschung von EnCN Net und Fraunhofer IISB konnte gezeigt werden, dass eine kontaktlose Ladestation theoretisch ähnlich gut funktioniert wie die heute übliche Ladestation mit Kabelanschluss.

Prof. Michael Jostmeier vom Projekt DESIGN hat 2013 die Visualisierung möglicher Gehäuseformen für diese Ladestation abgeschlossen und 2013/14 auf Basis der 3D-Daten einen Prototyp erzeugen lassen (3D-Druck auf Polyamid-Basis).

1.2 Prototypkonstruktion/Animationsfilm der Ladestation

Parallel dazu wurde der Prototyp (vor der Fertigstellung) in einem 3D-Animationsfilm gezeigt und das Interface für Fahrzeugbesitzer entwickelt. Im 3D-Visualisierungszentrum der TH Nürnberg lassen sich Fahrzeugsteuerung, Interface und Prototyp virtuell testen.

- Prof. Jostmeier in Kooperation mit Christian Joffe, Fraunhofer IISB
- Virtuelles Produktdesign und Visualisierung mit Patrick McCue, Mitarbeiter EnCN Design
- 3D-Animationsfilm in Kooperation mit Viaframe, Nürnberg
- Der erfolgreiche Prozess zur Darstellung und Produktion von Prototypen und Objekten wird an der Fakultät Design der TH Nürnberg ab 2017 mit einer eigenen Professur gelehrt (CGO, Computer Generated Objects).

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Walter Mehl
Prof. Dr. Florian Gallwitz
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm



Prof. Mehl

Prof. Gallwitz

E-Mail

Walter.Mehl@th-nuernberg.de
Florian.Gallwitz@th-nuernberg.de

Telefon

+49 911 / 5880 2634 (Prof. Mehl)
+49 911 / 5880 1677 (Prof. Gallwitz)

Web

www.encn.de
<http://tinyurl.com/gwtnb9t>



Abbildung 156: Präsentation des Prototypen der Ladestation auf der Langen Nacht der Wissenschaften 2013 in Nürnberg
(©EnCN/McCue)

2 Architekturvisualisierung (Fassadenbegrünung)

2.1 Interaktive Visualisierung einer Fassadenbegrünung

Auf der Basis eines 3D-Gebäudemodells entwickelt Stefan Klingenberg im Projekt DESIGN eine Android-Software (App), die das Nachbargebäude des EnCN (Fürther Straße 248) mit verschiedenen Fassadenbegrünungen zeigt. Eine zweidimensionale Darstellung des Gebäudes auf Papier (eine gedruckte Ansicht der Gebäudefront) dient als AR-Tracking-Point. Die App nutzt diesen Tracking-Point, um auf dem Tablet-Display eine dreidimensionale Darstellung zu liefern. Ändert man Distanz oder Betrachtungswinkel für die Tablet-Kamera, wird die AR-Darstellung entsprechend detailreicher bzw. zeigt das Gebäude aus verschiedenen Blickwinkeln.



Abbildung 157: Eine gedruckte Ansicht des Gebäudes (im Hintergrund) dient als Tracking-Vorlage für die AR-Darstellung des EnCN-Gebäudes auf einem Tablet (EnCN/Klingenberg)

Ein Wahlschalter in der App erlaubt den Wechsel zwischen verschiedenen Varianten der Fassadenbegrünung.

- Stefan Klingenberg mit Jan Serode, Architektur, Nuremberg Campus of Technology (NCT), Visualisierung

- Stefan Klingenberger entwickelt eine interaktive App für Android-Tablet (Augmented Reality) mit Sebastian Prandl (NCT) in ca. 4 Mann-Monaten
- Die App dient als Prototyp für die AR-Visualisierung von Gebäuden (Außenansicht) und Räumen (Innenansicht); in einer zweiten Version ab 2017 sollen Gebäudeteile markiert oder TFM-Anlagen gesteuert werden

3 Vollautomatische Detektion und Analyse von PV-Anlagen

3.1 Programmierung einer autonomen Multicopter-Steuerung

Defekte in installierten PV-Modulen führen zu deutlichem Leistungsverlust, und viele Defekte sind mit bloßem Auge nicht erkennbar. Durch Schäden überhitzte Zellen sind jedoch auf Infrarotbildern deutlich erkennbar. Aufgrund der Größe insbesondere von Freifeld-PV-Anlagen bietet sich die Analyse mit einer an einem Multicopter befestigten Infrarotkamera an. Ziel ist es, solche Anlagen selbstständig abzufliegen und die Aufnahmen vollautomatisch auf Defekte zu analysieren.

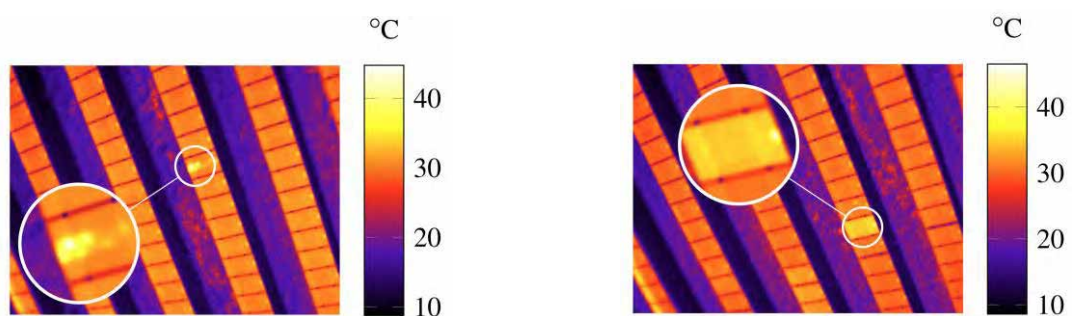


Abbildung 158: Punktförmige oder vollflächige Temperaturabweichungen kennzeichnen Defekte in PV-Anlagen; 98 Prozent der defekten Module lassen sich mit diesem Teilprojekt erkennen (© EnCN/Gallwitz).

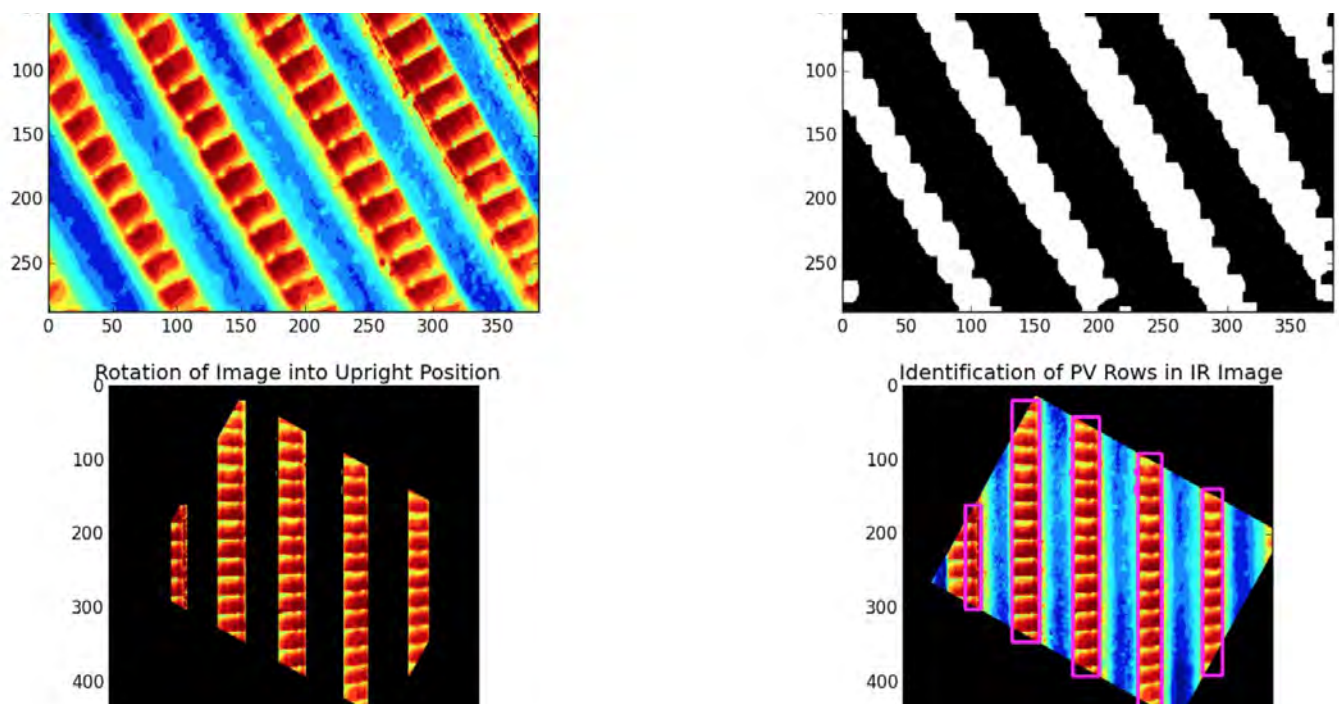


Abbildung 159: Autonome Bildanalyse und Detektion von PV-Anlagen in Videosequenzen (© EnCN/Gallwitz).

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden in Zusammenarbeit mit dem ZAE Bayern mehrere Teilprobleme bearbeitet, die zur Bewältigung dieser Aufgabe verbunden sind:

- der autonome Flug sowie die selbstständige Landung des Multicopters auf einer Ladestation,

- die Stabilisierung des IR-Videofilms unter Zuhilfenahme der auf dem Multicopter vorhandenen Inertialsensoren,
- die automatische Erkennung der einzelnen PV-Module im IR-Videostream und deren räumliche Zuordnung,
- die automatische Erkennung und Klassifikation von Defekten anhand des aufgenommenen IR-Videostreams.

Das im Rahmen dieses Teilprojekts entwickelte Verfahren ist in der Lage, auf der Basis von Multicopter-basierten Infrarotaufnahmen von PV-Anlagen vollautomatisch defekte Zellen zu erkennen. Auf einer Teststichprobe mit 1544 Modulen konnten 98 Prozent der defekten Module korrekt erkannt werden (Erkennungsrate bzw. Recall). Von den als Defekt erkannten Modulen waren 90 Prozent tatsächlich defekt (Precision bzw. positiver Vorhersagewert).

- Prof. Dr. Florian Gallwitz, Fakultät Informatik mit Sergiu Deitsch (früher: Sergiu Dotenco) im Rahmen einer kooperativen Promotion (Fakultät Informatik der TH Nürnberg / Fakultät Informatik der Friedrich Alexander Universität Erlangen)

3.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeiten erzielten Ergebnisse sollen im EnCN2 auf die Erfassung von dreidimensionalen Strukturen (Gebäuden) erweitert werden. Neben der automatischen Erkennung von defekten Solarmodulen ist hierbei insbesondere die Erkennung von Wärmeverlusten an der Gebäudeoberfläche von Interesse.

4 Schlussworte

Trotz des Verlustes eines wichtigen Kooperationspartners für die AR-Visualisierung nach halber Laufzeit des Projektes konnte das Projekt DESIGN seine Brückenfunktion und Darstellungskompetenz für Themen rund um die Energiekette beweisen. Die projektinterne Verbindung von Grundlagenforschung der Bildanalyse und angewandter Forschung bei der Gebäudevisualisierung sollte mit einer Anschlussfinanzierung weitere nutzbare Methoden und Patente auf dem Gebiet der Gebäudeautomatisierung ergeben.

ECONOMY

BETEILIGTE GRUPPEN	TEILPROJEKTE
<p>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre insb. Wirtschaftstheorie (Prof. Dr. Veronika Grimm) Professur für Volkswirtschaftslehre, Industrieökonomie und Energiemärkte (Prof. Dr. Gregor Zöttl)</p>	<p>TP1: Auswirkung des Regulierungsrahmens auf Investitionsanreize in konventionelle und erneuerbare Energien (Prof. Dr. Veronika Grimm/FAU-WiSo)</p> <p>TP2: Auswirkungen des Regulierungsrahmens auf Netzausbau und Investitionen in Erzeugungskapazitäten (Prof. Dr. Veronika Grimm/FAU-WiSo)</p> <p>TP3: Optimierung von Auktionen- und Handelsplattformen im Energiemarkt (insb. Spotmärkte für Strom und Emissionsrechteteilhandel) (Prof. Dr. Veronika Grimm/FAU-WiSo)</p> <p>TP4: Experimentelle Studien zur Nutzung und Akzeptanz neuer Technologien (Prof. Dr. Veronika Grimm/FAU-WiSo)</p>

Projektbericht EnCN1

Das Projekt ECONOMY untergliedert sich laut Antrag in vier Teilprojekte. Im Verlauf der ersten Jahre sind Teilprojekt 1 und Teilprojekt 3 umfangreich bearbeitet worden und in den noch umfangreich laufenden Arbeiten zu Teilprojekt 2 aufgegangen.

In Teilprojekt 3 wurden die Auswirkungen verschiedener Handelsregeln an Strommärkten auf die Produktionsanreize von Erzeugungsunternehmen und die Preisbildung an Strommärkten untersucht. In Teilprojekt 1 lag der Fokus auf den Investitionsanreizen in Erzeugungskapazität. Die Projektergebnisse und die aus den Untersuchungen hervorgegangenen Publikationen wurden im Jahresbericht 2014 umfangreich dokumentiert. Diese Arbeiten sind im Verlauf der letzten beiden Jahre in ein integriertes Modell eingeflossen, das simultan Investitionsanreize in Erzeugungskapazität (durch private Unternehmen) und Netzausbau (gelenkt durch den Regulierer) betrachtet (Teilprojekt 2 im Antrag). Im Verlauf des Jahres 2015 und 2016 wurde der Ansatz zum einen verwendet, um den Netzausbau des Übertragungsnetzes unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu untersuchen. Zum anderen wurde die Methodik auf Fragestellungen im Verteilnetz angewandt. Hierbei ging es im Wesentlichen um die Betrachtung von Geschäftsmodellen unter verschiedenen Annahmen bezüglich der Rahmenbedingungen für die privatwirtschaftlichen Unternehmen und den Netzbetreiber. In die beschriebenen Aktivitäten sind umfangreiche Drittmittel eingeflossen, weshalb weit mehr Aktivität entfaltet werden konnte, als es die Fördermittel aus dem EnCN alleine ermöglicht hätten. Die Arbeiten haben sich in den Jahren 2015/16 in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, aber auch in verschiedenen Gutachten niedergeschlagen. Die in diesen Bereichen erzielten Ergebnisse werden im folgenden Bericht in Abschnitt 1 und 2 beschrieben.

In Teilprojekt 4 wurde eine experimentelle Studie zur Nutzung und Akzeptanz neuer Technologien umgesetzt, deren Abschluss unmittelbar bevorsteht. Hier wurde insbesondere eine Panelbefragung mit integriertem Feldexperiment weiter vorangetrieben und ausgewertet, die in Kooperation mit der N-Ergie AG und der Caterva GmbH durchgeführt wurde. Details hierzu finden sich in Abschnitt 3 des folgenden Berichts.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

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

1 Investitionsanreize im Strommarkt

1.1 Modellentwicklung

In den Jahren 2011 bis 2016 haben die Wissenschaftler aus ECONOMY in Kooperation mit Wissenschaftlern aus SIMULATION in verschiedenen Arbeitsgruppen an der Entwicklung des EnCN-Strommarktmodells GATE (Generation And Transmission Expansion) gearbeitet. Das Modell erlaubt es, Investitionsanreize in Erzeugungskapazität und Netzausbau in Abhängigkeit der Rahmenbedin-

gungen am Strommarkt zu untersuchen. In die Arbeiten sind unter anderem Vorarbeiten aus den Teilprojekten 1 und 3 des Förderantrags eingeflossen, in denen der Fokus auf Investitions- und Produktionsanreizen der Stromerzeuger lag. Folgende Fortschritte wurden erzielt: (i) es wurden Verfahren zur Lösung der mehrstufigen berechenbaren Gleichgewichtsmodelle entwickelt, die das Zusammenspiel von Märkten mit regulierten Bereichen abbilden (Grimm et al., 2016a). Insbesondere konnte gezeigt werden, unter welchen Rahmenbedingungen das zugrundeliegende mehrstufige Marktspiel eine eindeutige Lösung hat (Grimm et al., 2016b). (ii) Die Modellierung von Preiszonen wurde näher untersucht, aktuell beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit dem Problem optimaler Zonierung (Grimm et al., 2016c). (iii) Es wurden verschiedene theoretische Beiträge auf Basis des Modells erarbeitet, z.B. zu den Themen „Cost- versus market based redispatch“ (Grimm et al., 2016d) und „On the long run effects of market splitting: Why more price zones might decrease welfare“ (Grimm et al., 2016e). Zahlreiche grundlegende Arbeiten wurden in hochrangigen internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Darüber hinaus wurde das GATE-Modell verwendet, um aktuelle energiepolitische Fragen zu beleuchten, teilweise in Kooperation mit Partnern aus Politik und Wirtschaft.

1.2 Anwendung

In verschiedenen Beratungsprojekten und Gutachten wurde das GATE-Modell auf einen realistischen Kontext hin kalibriert, um Vorschläge aus der energiepolitischen Diskussion zu bewerten. Prof. Dr. Veronika Grimm und Prof. Dr. Gregor Zöttl haben zusammen mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern Bastian Rückel und Christian Sölch ein Gutachten für die Monopolkommission zu regionalen Preiskomponenten im Strommarkt erstellt (Grimm et al., 2015a). Das Gutachten wurde im Rahmen der Vorbereitung des 71. Sondergutachtens der Monopolkommission „Energie 2015: Ein wettbewerbles Marktdesign für die Energiewende“ von der Monopolkommission beauftragt. In dem Gutachten wurde das am Energie Campus Nürnberg entwickelte GATE-Modell genutzt, um die Auswirkungen verschiedener Energiemarktdesigns auf Investitionsanreize in Kraftwerke und den notwendigen Netzausbau zu untersuchen. Das Gutachten analysiert umfangreich regional differenzierte Preise im Stromgroßhandel an der Börse, regional differenzierte Netzgebühren für die Erzeuger, aber auch die Effekte der Abregelung der EE-Einspeisung oder veränderte Planungsgrundlagen beim Netzausbau. Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass der notwendige Netzausbau deutlich von den Rahmenbedingungen am Strommarkt abhängig ist. Das vorgeschlagene Maßnahmenpaket führt zu gesamtwirtschaftlichen Einsparungen von bis zu 700 Mio. € pro Jahr.

Ebenfalls im Jahr 2015 hat die Expertenkommission „Stärkung von Investitionen in Deutschland“, deren Mitglied Veronika Grimm seit 2014 ist, ihren Abschlussbericht an Bundeswirtschaftsminister Gabriel übergeben (Fratzcher et al., 2015).

Den Ausführungen zur Energiepolitik liegen ebenfalls die Ergebnisse des EnCN-Bereichs ECONOMY zugrunde. Im Nachtrag zu dem Bericht kam es außerdem zu dem Beitrag „Investitionsanreize im Strommarkt der Zukunft“ in dem Band „Welche Industrie wollen wir?“ (Grimm und Zöttl, 2015).

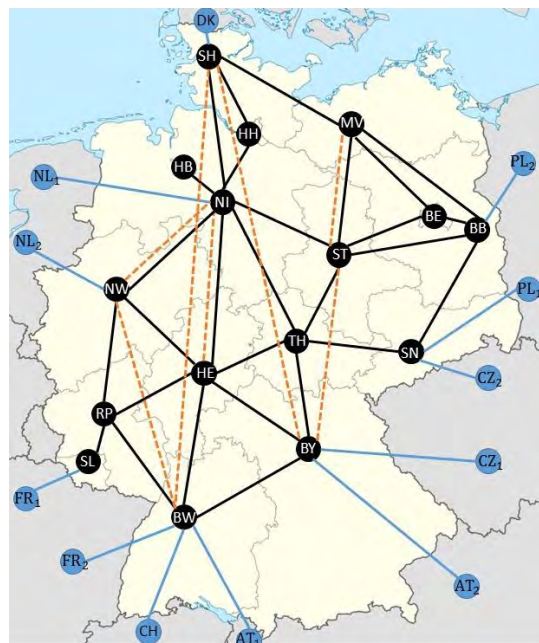


Abbildung 160: Netznoten Deutschland und Nachbarstaaten für Deutschland Modellierung.
Aus: Grimm et al. (2015a) „Regionale Preiskomponenten im Strommarkt – Gutachten für die Monopolkommission“.

In der zweiten Jahreshälfte entwickelte sich darüber hinaus eine Kooperation mit der ThyssenKrupp AG, in deren Rahmen ebenfalls das GATE-Modell genutzt wurde, um Investitionsanreize in die Flexibilisierung der industriellen Nachfrage im Stromsektor zu bewerten. Die Ergebnisse sind in Ambrosius et al. (2016a und 2016b) zusammengefasst.

Im Jahr 2016 wurde die Gruppe EnCN Economy darüber hinaus gemeinsam mit der Prognos AG (Berlin) von der N-Ergie AG beauftragt, in einem Gutachten die Möglichkeiten zu untersuchen, durch dezentrale Lösungen in der Stromversorgung den im Rahmen der Energiewende notwendigen Netzausbau zu reduzieren. Die Studie „Dezentralität und Zellulare Optimierung: Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf“ (Prognos/FAU/EnCN, 2016) untersucht verschiedene moderate Anpassungen des Strommarktdesigns sowie verschiedene Flexibilitätsoptionen und zeigt, dass schon moderate Anpassungen der Rahmenbedingungen am Strommarkt zu substantziellen Effizienzgewinnen am Strommarkt (in Höhe von 1,7 Mrd. Euro pro Jahr) und einer signifikanten Reduktion des notwendigen Netzausbaus führen können (vgl. auch Grimm et al., 2016f).

Eine große Sichtbarkeit im deutschsprachigen Raum erfahren die Aktivitäten der Gruppe auch dadurch, dass im Frühjahr 2017 ein Überblicksartikel zur Strommarktmodellierung in der Zeitschrift „Perspektiven der Wirtschaftspolitik“ erscheinen wird. Die Zeitschrift wird von der größten deutschen Ökonomenvereinigung herausgegeben und auch in den Bundesministerien rezipiert. Der Artikel verdeutlicht insbesondere auch die Alleinstellungsmerkmale des GATE-Modells durch die integrierte Betrachtung von Investitionsanreizen in Erzeugungskapazität und Netze in einem Marktkontext.

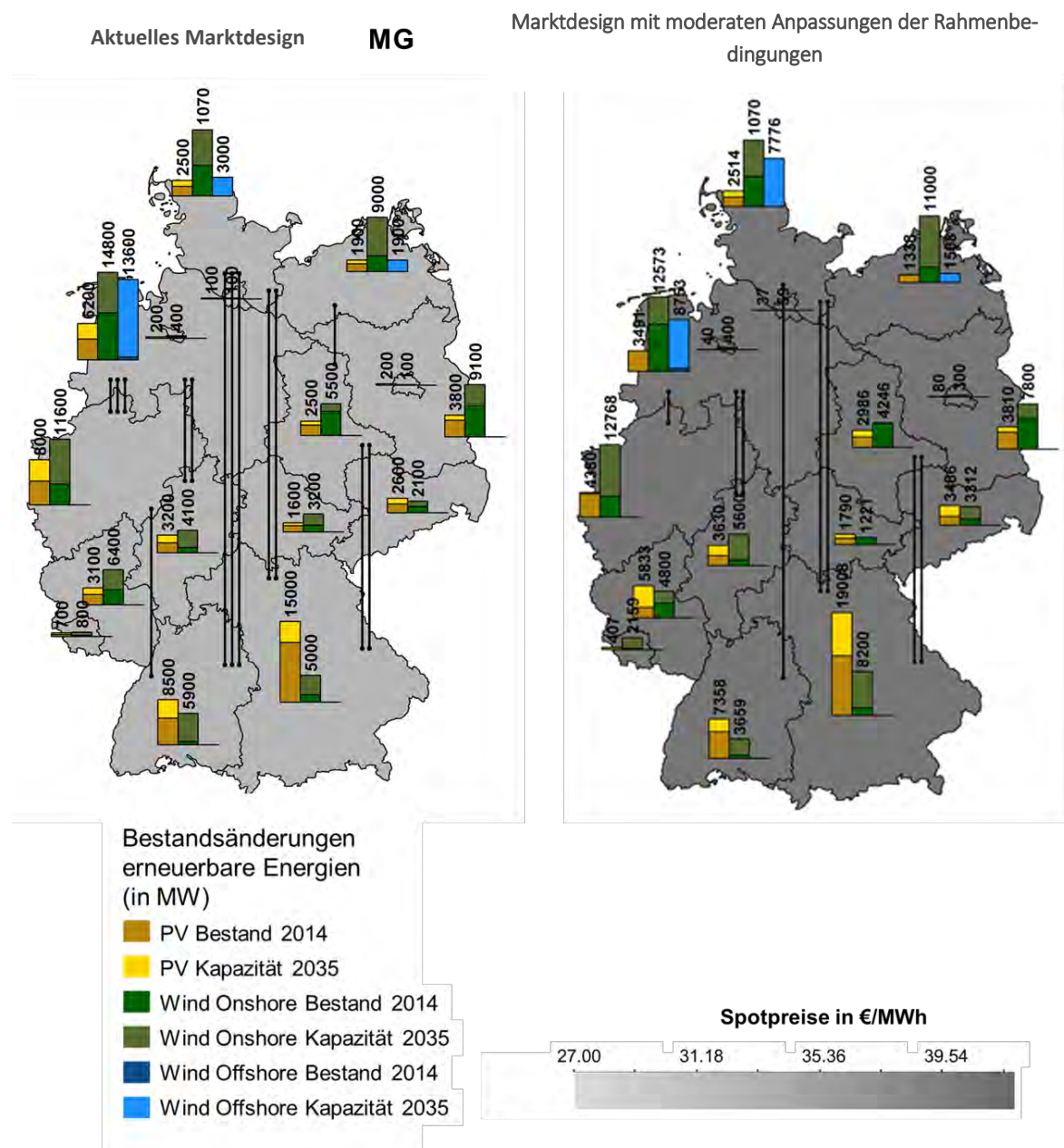


Abbildung 161: Netzausbau, Ausbau erneuerbarer Energien und Preisniveau unter aktuellem Marktdesign (links) und in einem Marktdesign mit moderaten Anpassungen der Rahmenbedingungen (rechts). Die Anpassungen umfassen ein optimales Einspeisemanagement bei der erneuerbaren Erzeugung, die Antizipation von Redispatch-Möglichkeiten bei der Netzplanung sowie eine optimale Standortwahl für erneuerbare Energien. Die Anpassungen führen zu Einsparungen von über 1,7 Mrd. € pro Jahr und fast einer Halbierung des notwendigen Übertragungsnetzausbaus. Aus: Prognos/FAU/EnCN (2016) „Dezentralität und Zellulare Optimierung: Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf“.

1.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Mirjam Ambrosius, Prof. Dr. Veronika Grimm, Thorsten Kleinert, Prof. Dr. Frauke Liers, Prof. Dr. Alexander Martin, Dr. Lars Schewe, Prof. Dr. Martin Schmidt, Bastian Rückel, Christian Sölch, Martin Weibelzahl, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Kooperation im EnCN: SIMULATION, TRANSPORT - Externe Partner: Monopolkommission, BMWi, DIW Berlin, ThyssenKrupp AG, N-Ergie AG, Prognos AG

2 Geschäftsmodelle im Smart Grid

2.1 Modellentwicklung

In enger Zusammenarbeit mit dem Projekt „Smart Grid Solar“ wurden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Modelle angepasst, um Zusammenhänge im Verteilnetz darstellen zu können. Ziel der Arbeiten ist es, das Zusammenspiel von Netzen, Erzeugern, Speichern und Verbrauchern bei der Planung von Smart Grids zu untersuchen und zu analysieren, welche Marktregeln zusammen mit den wirtschaftspolitischen Steuerungsmechanismen zu sinnvollen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure am Markt führen.

Um Investitionsentscheidungen in Netzausbau und Erzeugungsanlagen im Verteilnetz gleichzeitig betrachten zu können, sind Netzmodelle notwendig, die die technische Realität abbilden aber gleichzeitig erlauben, den ökonomischen Hintergrund zu berücksichtigen. Solche Netzmodelle sind für das Übertragungsnetz bereits bekannt. Die für das Verteilnetz bekannten Modelle weisen in der Regel eine höhere Komplexität auf, denn dort sind nicht nur die thermischen Kapazitäten, sondern auch die Spannungsabfälle für ökonomische Betrachtungen relevant. Im Rahmen der Arbeiten am EnCN wurde ein entsprechend geeignetes quadratisches Netzmodell verwendet und mit Hilfe einer linearen Approximation so umformuliert, dass damit auch ökonomische Fragestellungen adressiert werden können (siehe Grimm et al., 2016g). Dabei wurde darauf geachtet, dass die technische Genauigkeit bestmöglich erhalten bleibt. Insbesondere wurde hierbei der Trade-off zwischen Netzausbauplanung und Wechselrichterinvestitionen im Verteilnetz untersucht. Dieser Ansatz wurde bereits mit alternativen Methoden aus der Literatur verglichen und soll in der Zukunft mit tatsächlich gemessenen Lastflüssen validiert werden.

Parallel zur Entwicklung einer geeigneten Formulierung der technischen Aspekte erfolgte die Entwicklung einer geeigneten Formulierung zur Abbildung der ökonomischen und institutionellen Aspekte der Modellierung auf Verteilernetzebene. Auf der Basis der Aktivitäten der EnCN-Wissenschaftler wurde im Jahr 2013 ein „Emerging Field Projekt“ („Sustainable Business Models for Smart Energy Systems“) an der FAU initiiert, das die Modellierung am EnCN mit betriebswirtschaftlichen und juristischen Perspektiven verknüpft.

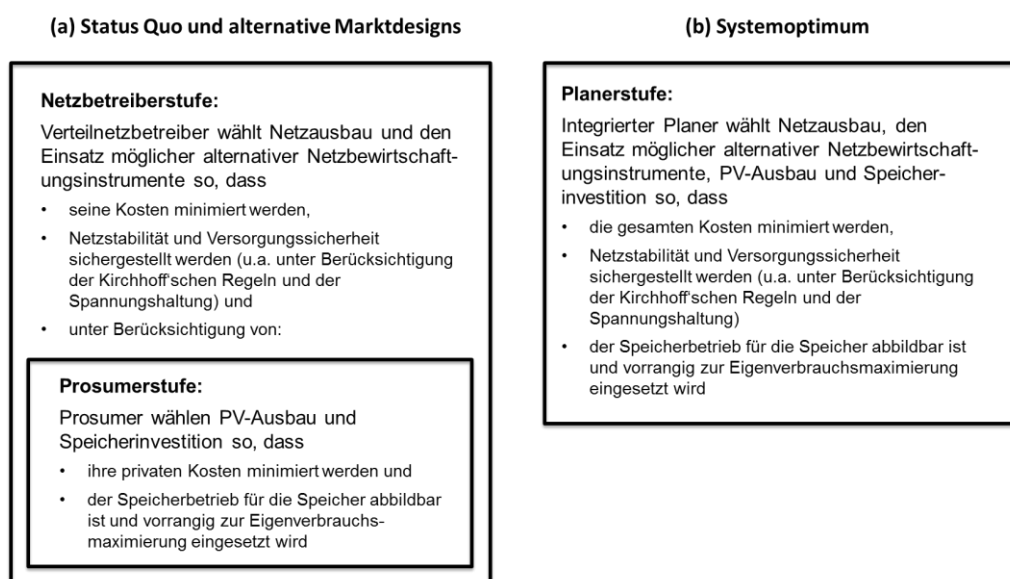


Abbildung 162: Skizze des zweistufigen Marktmodells zur Modellierung von aktuellen (Status Quo) und alternativen regulatorischen Rahmenbedingungen (links) und des einstufigen Systemoptimums (rechts). Vereinfachte Darstellung in Anlehnung an Grimm et al. (2016h).

2.2 Anwendung

Als Kernstück der ökonomischen Analyse im Projekt „Smart Grid Solar“ soll eine quantitative Analyse der Anreize zur Umsetzung eines Smart Grid Systems durch die relevanten Marktteilnehmer unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Hierbei erfolgt in den Modellen die explizite Berücksichtigung der durch den Regulierungsrahmen für die Verteilernetzbetreiber induzierten Anreize des Netzbetriebes und des Netzausbaus. Die Ansätze dienen der Analyse der Auswirkungen des aktuellen Regulierungsrahmens (Status Quo) und liefern eine Methode zur quantitativen Analyse möglicher Änderungen dieses Rahmens. Die Analyse erfolgt mit Hilfe eines zweistufigen Marktmodells, welches in Abbildung 162 (a) skizziert wird. Um die Ergebnisse einordnen zu können, werden sie mit dem Systemoptimum verglichen, in dem ein Smart-Grid kostenminimierend von einem integrierten Planer installiert wird, ohne dabei die Anreize der einzelnen Akteure zu berücksichtigen (siehe Skizze in 3 (b)). Dieses ist zwar in der Modellrechnung berechenbar, jedoch aufgrund von Anreizproblematiken nicht real implementierbar und kann daher nur als Benchmark dienen.

Neben den aktuell geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen und dem Systemoptimum werden Szenarien wie das Einspeisemanagement von regelbaren PV-Anlagen, alternative Netzentgeltmechanismen und die Subvention von Speicherinvestitionen untersucht. Erste Ergebnisse eines fiktiven 6-Knoten-Testnetzes zeigen, dass unter den gegebenen Marktregeln so gut wie keine Investitionsanreize für ein netzdienliches Verhalten und netzentlastende Systeme wie Speicher auf Seiten der privaten Akteure bestehen und daher meist als einziges Mittel auf den Netzausbau zurückgegriffen werden muss (siehe Grimm et al., 2016h). Bei den bisher untersuchten alternativen Rahmenbedingungen liefert ein leistungsorientiertes Netzentgelt, das auch für die Einspeisung von PV-Strom erhoben wird (sogenannte G-Komponente), die größten privatwirtschaftlichen Anreize in Speicher zu investieren und damit Netzentgelte zu sparen. Für die Reduzierung des Netzausbaus stellt sich auch im Verteilernetz das Einspeisemanagement als gut geeignete Option heraus (was sich mit den Ergebnissen zum Übertragungsnetz in Kapitel 1 deckt). Aktuell wird das Modell für ein reales Verteilernetz kalibriert und soll in naher Zukunft mit den dort gemessenen Werten für das Jahr 2015 validiert werden. Um anschließend auch eine mögliche Anpassung in den entsprechenden Gesetzestexten vorschlagen zu können, findet ein enger Austausch mit dem Lehrstuhl für Steuerrecht und Öffentliches Recht (Prof. Dr. Roland Ismer) statt.

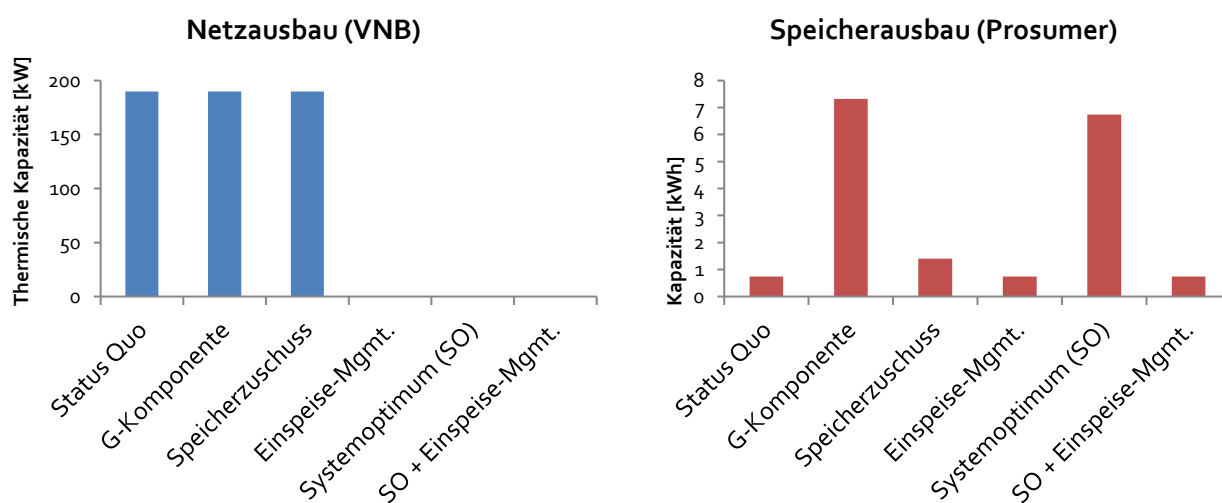


Abbildung 163: Modellergebnisse zum 6-Knoten-Testnetz für Status Quo, Systemoptimum (SO) und bisher betrachtete alternative Marktdesigns; Netzausbau des regulierten Verteilernetzbetreibers (VNB) in blau (links) und Speicherausbau der privatwirtschaftlichen Prosumer in rot (rechts). Aus: Grimm et al. (2016h).

2.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Prof. Dr. Veronika Grimm, Julia Grübel, Prof. Dr. Roland Ismer, Bastian Rückel, Christian Sölch, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Beteiligte Wissenschaftler: Dr. Sebastian Martin (University of Malaga, Spanien), Dr. Olav Krause (The University of Queensland, Australien)

Kooperierende Wissenschaftler im Emerging Field Projekt: Prof. Dr. Wolfgang Arlt, Prof. Dr. Christoph Brabec, Prof. Dr. Andreas Fürst, Prof. Dr. Nadine Gatzert, Prof. Dr. Veronika Grimm, Prof. Dr. Alexander Martin, Prof. Dr. Kai-Ingo Voigt, Prof. Dr. Gregor Zöttl

Kooperation im EnCN: SIMULATION, SOLARFABRIK DER ZUKUNFT, TRANSPORT

Externe Partner: Bayernwerke, Projekt Smart Grid Solar, ZAE Bayern

3 Investitionsverhalten am Beispiel vernetzter Kleinspeicher

3.1 Projektbeschreibung

Auf Grundlage der Expertise des Lehrstuhls für Wirtschaftstheorie (Prof. Grimm) im Bereich der Experimentellen Wirtschaftsforschung wurde das Team von ECONOMY in das Kooperationsprojekt „SWARM – Innovative Lösungen durch Kooperation in der Energieforschung“ eingebunden. Zielsetzung des Gesamtprojekts ist es, disziplinübergreifend sowohl aus technischer, ökonomischer wie auch verhaltenswissenschaftlicher Perspektive verschiedene Fragestellungen zu untersuchen, die sich mit der wirtschaftlichen und netzverträglichen Betriebsweise eines verteilten Schwarms von Energiespeichern in der Niederspannungsebene beschäftigen. Die Installation „virtueller Kraftwerke“ auf Grundlage von Kleinstspeicherverbänden wird als eine mögliche künftige Schlüsselanwendung gesehen, um den sich aus der zunehmenden Netzeinspeisung erneuerbarer Energien ergebenden Herausforderungen für alle mit der Stromversorgung befassten Akteure zu begegnen. Der dezentrale Charakter des Lösungsansatzes stellt – neben der technischen Umsetzung – jedoch auch neue Anforderungen an die Einbindung der Endverbraucher, deren Teilhabe in Form aktiver Investitionsbereitschaft wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung ist. Diesem Wandel des Rollenverständnisses und dessen Bedeutung für die effiziente Gestaltung des gesamtindustriellen Transformationsprozesses Rechnung tragend, standen in diesem Teilprojekt konkrete Fragen nach der Offenheit, Akzeptanz- und Adaptionbereitschaft für die verwendete Speichertechnologie im Mittelpunkt. Mit dem Einsatz verhaltensökonomischer und experimenteller Methoden im Rahmen einer mehrstufigen Panelbefragung zielte der Beitrag des Lehrstuhls für Wirtschaftstheorie auf zwei Themenkomplexe, deren wesentliche Inhalte in der nachfolgenden Abbildung exemplarisch zusammengefasst sind.

Zum einen sollten die technologiespezifische Akzeptanz und das Adaptionsverhalten für die koordinierten Kleinspeicher analysiert, das Akzeptanzverhalten für die Speichertechnologie im Zeitverlauf untersucht und – sofern möglich – die bedeutendsten Determinanten der individuellen Investitionsneigung bestimmt werden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Speichertechnologie unter potenziellen Nutzern ein hohes generelles Akzeptanzpotenzial aufweist und in der individuellen Entscheidungsfindung über die Anschaffung eines Kleinspeichers finanzielle Aspekte besonders betont werden. Darüber hinaus konnten in einer Clusteranalyse vier verschiedene Grundtypen identifiziert werden, die sich systematisch in ihrer Anspruchshaltung an finanzielle, ökologische und sicherheitsspezifische Aspekte der Speichertechnologie unterscheiden. Diese Cluster variieren zudem signifikant in sozio- und psychografischen Größen und ihrer persönlichen Investitionsneigung. So scheinen insbesondere ältere Kunden, die der Energiewende grundsätzlich positiv gegenüberstehen und der eigenen Versorgungssicherheit eine hohe Bedeutung beimessen, besonders investitionsaffin.

Welche **Kriterien** müssen erfüllt sein, damit innovative, dezentral ausgerichtete Speichertechnologien **erfolgreiche Anwendung** finden?

1. Welche Größen beeinflussen die **individuelle Investitionsentscheidung** und treiben **Akzeptanz- und Adaptionsneigung** der Speichertechnologie?

- **Finanzielle Kriterien** (insb. Senkung der Stromkosten) sind **dominanter Nutzenaspekt**
- Gewichtung einzelner Kriterien jedoch unterschiedlich: Vier **verschiedene motivationale Grundhaltungen**, unterschiedliche Ansprüche hinsichtlich des
 - Finanziellen Nutzens
 - Ökologischen Nutzens
 - Sicherung d. Stromversorgung
- Höhere **tatsächliche Investitionsneigung** bei älteren Personen mit altruistischem Nutzenverständnis und idealistischer Motivlage
- **Grundlegende aktuelle Investitionshemmnisse**: Zweifel an technologischer Reife und Unsicherheit über zukünftige Preisentwicklung

Technologie-
Offenheit,
Akzeptanz und
Adaption?

2. Wie wirken die **Rahmenbedingungen eines Pilotprojekts** auf Erwartungshaltung und Teilnahmebereitschaft potenzieller Teilnehmer?

- Entscheidende Kriterien für die **Bereitschaft zur Teilnahme** an einem Pilotprojekt:
 - Qualität der Kommunikations- und Informationsleistung der Projektverantwortlichen
 - Grundlegendes Verständnis der Technik
- **wissenschaftliche Begleitung und staatliche Förderung** eines Pilotprojekts haben einen Einfluss auf die Einschätzung
 - der Innovativität des getesteten Produkts
 - der Durchsetzungsfähigkeit der Technologie
 - des potenziellen Beitrags zur Energiewende
- **Positive Verbundwirkung** durch gemeinsame Beteiligung wissenschaftlicher und staatlicher Institutionen

Insgesamt herrscht eine **positive und offene Grundeinstellung** gegenüber Speicherlösungen, **hohes Akzeptanzpotenzial** und die **Bereitschaft zu privaten Investitionen**

Abbildung 164: Überblick über Fragestellungen und bisherige Ergebnisse des Projekts.

Zum anderen wurde untersucht, welchen Einfluss die organisatorische und institutionelle Ausgestaltung von Pilotprojekten generell auf die Teilnahmebereitschaft und Erwartungshaltung potenzieller Anwender ausübt. Hier weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Aufstellung des Projektkonsortiums die Wahrnehmung der Probanden durchaus beeinflusst – insbesondere im Hinblick auf für die Entscheidung über die Teilnahme an einem Pilotprojekt entscheidende Kriterien, wie zum Beispiel die Einschätzung der Innovativität des einzuführenden Produkts oder dessen Beitrag zur Energiewende. Insgesamt konnte eine positive Verbundwirkung der gemeinsamen Beteiligung wissenschaftlicher und staatlicher Akteure an Pilotprojekten festgestellt werden, die der teilweise unter isolierter Beteiligung zu beobachtenden Wirkung auf die Wahrnehmung der Teilnehmer entgegenstand.

3.2 Gegenwärtiger Stand und Ausblick 2017

Das Gesamtprojekt SWARM befindet sich aktuell noch in Bearbeitung. Für 2017 ist die Abgabe und Veröffentlichung eines gemeinsamen Abschlussberichts aller am Projekt beteiligten Lehrstühle (LS für Elektrische Energiesysteme, Prof. Luther und LS für Informatik 7, Prof. German) geplant, in dem die Ergebnisse des Gesamtprojekts detailliert beschrieben werden. Die im Rahmen dieser Teilstudie geplanten Befragungen wurden bereits im Jahr 2016 abgeschlossen. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurden alle skizzierten Meilensteine planmäßig erreicht: In Abstimmung mit den Praxispartnern wurden verschiedene experimentelle Befragungen durchgeführt, die Ergebnisse den Projektpartnern präsentiert und in ausführlichen Zwischenberichten dargestellt. Zudem wurden in Kooperation aller beteiligten Lehrstühle und Praxispartner gemeinsame Forschungspapiere verfasst, die auf verschiedenen Fachkonferenzen und –veranstaltungen (z.B. IRES 2016, Cluster-Treff Bayern Innovativ 2016, OTTI 2017) der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt wurden (German et al, 2015; German et al, 2016). Für 2017 sind zudem weitere wissenschaftliche Publikationen auf Grundlage der in diesem Projekt erhobenen Daten geplant.

3.3 Beteiligte Wissenschaftler und Partner

Beteiligte FAU-Wissenschaftler: Prof. Dr. Veronika Grimm, Simon Mehl

Kooperation im EnCN: SIMULATION (Prof. German), NET (Prof. Luther);

Externe Partner: N-Ergie AG, Caterna GmbH

4 Schlussworte

In den Jahren 2011 bis 2015 haben die Wissenschaftler aus der Gruppe ECONOMY die Expertise aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen der FAU vereint, um das integrierte Strommarktmodell GATE zu entwickeln, das simultan Investitionsanreize in Erzeugungskapazität (durch private Unternehmen) und Netzausbau (gelenkt durch den Regulierer) analysieren kann und eine fundierte Bewertung energiepolitischer Vorschläge ermöglicht. Neben hochrangigen Wissenschaftlichen Publikationen im Rahmen der Modellentwicklung wurde die Expertise von EnCN Economy vielfach aus der Industrie (z.B. Thyssen-Krupp AG, N-Ergie AG) oder von öffentlichen Institutionen (z.B. Monopolkommission oder BMWi) angefragt, um Vorschläge zum Strommarktdesign zu bewerten. In zahlreichen Vorträgen im wissenschaftlichen Umfeld, aber auch bei Unternehmen, Ministerien, der Bundesnetzagentur oder vor der interessierten Öffentlichkeit wurde ein Beitrag zur energiepolitischen Debatte geleistet. Durch einen hohen Anteil von Drittmitteln an der Finanzierung und durch Kooperationen mit verschiedenen anderen Bereichen im EnCN und auch über die Grenzen des EnCN hinaus hat sich EnCN Economy von einem kleinen Forschungsbereich zu einer großen, schlagkräftigen Einheit entwickelt, die von Vertretern verschiedener Disziplinen (Wirtschaftswissenschaften, Mathematik und Rechtswissenschaft) gemeinsam getragen wird und intensiv auch mit den ingenieurwissenschaftlichen Bereichen im EnCN kooperiert. Dies kam nicht zuletzt in der Antragstellung für die zweite Förderphase des EnCN (für das Projekt Energiemarktdesign) zum Ausdruck.

Die Aktivitäten der Wissenschaftler in den Bereichen Marktmodellierung unter Berücksichtigung des Übertragungs- bzw. Verteilernetzes und im Bereich der Akzeptanzforschung sollen in den Jahren 2017 bis 2021 weiter vorangetrieben werden. Zusätzlich zu diesen Themen hat die Gruppe im Jahr 2016 im Rahmen eines Teilprojekts am SFB Transregio 154 „Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Gasnetzen“ damit begonnen, ihre Expertise im Bereich der Marktmodellierung auf den Gasmarkt zu übertragen, um so auch Gasmärkte sowie die Interdependenzen verschiedener Energiesysteme betrachten zu können. Diese Aktivitäten wird die Gruppe auch im Rahmen des EnCN2 weiter ausbauen.

Mit Hilfe der Förderung im Rahmen des EnCN und durch den Einsatz flankierender Drittmittel sowohl aus der Industrie als auch aus der öffentlichen Forschungsförderung ist aktuell eine Gruppe an Forschern aufgebaut worden, die ideale Expertise mitbringt, um die umfangreichen Vorhaben der zweiten Förderphase des EnCN zu meistern. Zur Festigung der internationalen und nationalen Netzwerke der Gruppe haben im Jahr 2016 verschiedene Workshops zum Austausch mit Wissenschaft und Politik stattgefunden, z.B. mit dem ifo Institut in München (März und September 2016), dem DIW Berlin (April 2016), ENGIE SA (Sommer 2016). In der Zukunft ist eine Fortführung dieser Aktivitäten sowie eine weitergehende inhaltliche Zusammenarbeit mit diesen Institutionen geplant.

5 Herausgehobene Tätigkeiten, Preise, Auszeichnungen

Prof. Dr. Veronika Grimm wurde in den Jahr 2011 bis 2016 in verschiedene Gremien berufen, u.a.:

- Mitglied des wissenschaftlichen Beirats, ifo Institut und CESifo (2016 - 2019)
- Mitglied im Verwaltungsrat des ifo Instituts (2016-2019)
- Mitglied des Beirats, ForumV (2016 – 2018)
- Research Fellow, CESifo, Munich (ab 2016)
- Vorsitzende des Wissenschaftlichen Beirats des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (2015 – 2018)
- Mitglied des Kuratoriums des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin (2015 – 2018)
- Mitglied des Erweiterten Vorstands des Vereins für Sozialpolitik (VfS) (2015- 2018)
- Mitglied der Expertenkommission "Stärkung von Investitionen in Deutschland" am BMWi (seit 2014)
- Mitglied des Steering Boards, Campus Future Energy Systems (seit 2015)
- Co-Editor, Perspektiven der Wirtschaftspolitik (PWP) (seit 2015)
- Managing Guest Editor, Journal of Economic Behavior and Organization (2014-2016)
- Guest Editor, Games, Special Issue "Games and Market Design"

6 Veröffentlichungen

- [1] M. Ambrosius; V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl. Modellierung von liberalisierten Strommärkten – Herausforderungen und Lösungen. Perspektiven der Wirtschaftspolitik, forthcoming, 2017
- [2] M. Ambrosius; V. Grimm; C. Sölch; G. Zöttl. Investment incentives for flexible energy consumption in the industry. 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), Porto, 1-5, 2016a
- [3] J. Bogenrieder; P. Hösch; C. Sölch; C. J. Brabec. Impact of a large-scale market integration on the orientation of photovoltaic modules. 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), Porto, 1-6, 2016
- [4] V. Grimm; A. Martin; M. Schmidt; M. Weibelzahl; G. Zöttl. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. European Journal of Operational Research, 254, 2, 493–509, 2016a
- [5] V. Grimm; A. Martin; M. Weibelzahl; G. Zöttl. On the long run effects of market splitting: Why more price zones might decrease welfare. Energy Policy, 94, C, 453-467, 2016e
- [6] V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl. Zur Reduktion des Netzausbaubedarfs durch Redispatch und effizientes Engpassmanagement: Eine modellbasierte Abschätzung. List Forum für Wirtschafts- und Finanzpolitik, 41, 4, 465-498, 2016f
- [7] Prognos/FAU/EnCN. Dezentralität und Zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Gutachten im Auftrag der N-Ergie AG, Nürnberg, 2016
- [8] M. Fratzscher (Vorsitz); S. Articus; F. Bsirske; R. Feiger; L. P. Feld; J. Fitschen; V. Grimm; R. Hoffmann; H. Jung; M. Kerber; W. Lemb; F.-J. Lersch-Mense; H.-H. Loewenstein ; T. Mayer; T. Oletzky; S. Russwurm; M. Schnitzer; U. Schröder; H. Schwager; E. Schweitzer; M. Vassiliadis; T. R. Böger; F. Nauschnigg; T. Posselt; A. Bender; W. Eckart; S. Eide; D. Homann; A. Lieber; L. Schuknecht; B. Alm; R. L'Hoest; M. Meurers; U. Neuhäuser; P. Steinberg; S. Weins; J. Zettelmeyer; M. Gornig; C. Michelsen; B. Pagel; and A. Schiersch. Stärkung von Investitionen in Deutschland. Bericht der Expertenkommission im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2015
- [9] V. Grimm; G. Zöttl; B. Rückel; C. Sölch. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. Gutachten im Auftrag der Monopolkommission, 2015a
- [10] V. Grimm; G. Zöttl. Investitionsanreize im Strommarkt der Zukunft. Wolfgang Lemb (Hrsg.): Welche Industrie wollen wir?, Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2015
- [11] F. Bolle; V. Grimm; A. Ockenfels; X. del Pozo. An Experiment on Supply Function Competition. European Economic Review, 63, 170-185, 2013
- [12] V. Grimm; L. Ilieva. An Experiment on Emissions Trading: The Effect of Different Allocation Mechanisms. Journal of Regulatory Economics, 44 (3), 308-338, 2013
- [13] V. Grimm; G. Zöttl. Investment Incentives and Electricity Spot Market Competition. Journal of Economics & Management Strategy, 22, 4, 832–851, 2013
- [14] C. Leepa; M. Unfried. Effects of a Cut-Off in Feed-in Tariffs on Photovoltaic Capacity: Evidence from Germany. Energy Policy, 56, 536-542, 2013

- [15] D. Teichmann; K. Stark; K. Müller; G. Zött; P. Wasserscheid; W. Arlt. Energy Storage in Residential and Commercial Buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy Environ. Sci.*, 5, 9044-9054, 2012
- [16] G. Zöttl. On Optimal Scarcity Prices. *International Journal of Industrial Organization*, 29, 5, 589–605, 2011
- [17] V. Grimm; G. Zoettl. Investment Decisions in Liberalized Electricity Markets: The Impact of Market Design. W. Franz; W. Gueth; H. J. Ramser; M. Stadler (eds.): *Wirtschaftswissenschaftliches Seminar Ottobeuren*, Band 40 (Marktmacht), Tuebingen: Mohr Siebeck, 2010
- [18] V. Grimm; G. Zoettl. Price Regulation under Demand Uncertainty. *The B.E. Journal of Theoretical Economics (Advances)*, 10 (1), 589-605, 2010b
- [19] G. Zöttl. A Framework of Peak Load Pricing with Strategic Firms. *Operations Research*, 58, 6, 1637-1649, 2010
- [20] D. Engelmann; V. Grimm. Bidding Behavior in Multi-Unit Auctions - An Experimental Investigation. *The Economic Journal*, 119 (537), 855-882, 2009

Working Paper:

- [1] M. Ambrosius; V. Grimm; C. Sölch; G. Zöttl. Investment Incentives For Flexible Demand Options Under Different Market Designs. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016b
- [2] 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. Working Paper, 2016
- [3] V. Grimm; J. Grübel; S. Martin; G. Zött. Distribution network modeling in electricity market environment. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016g
- [4] V. Grimm; J. Grübel; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl. Analysis of Market Mechanisms to Coordinate Economic Activities in Smart Grids. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016h
- [5] V. Grimm; T. Kleinert; F. Liers; M. Schmidt; G. Zöttl. Optimal Price Zones in Electricity Markets: A Mixed-Integer Multilevel Model and Global Solution Approaches. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016c
- [6] V. Grimm; A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl. Market-based Redispatch May Result in an Inefficient Dispatch. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016d
- [7] V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl. Regionally differentiated network fees to provide proper incentives for generation investment. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016
- [8] V. Grimm; B. Rückel; C. Sölch; G. Zöttl. Zonal Pricing in the German Electricity Market. Mimeo FAU Erlangen-Nürnberg, 2016
- [9] V. Grimm; L. Schewe; M. Schmidt; G. Zöttl. Peak-Load Pricing on a Network. Preprint: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2015/08/5072.html, 2016b
- [10] L. Schewe; V. Grimm; J. Grübel; M. Schmidt; G. Zöttl. A multilevel programming approach for gas market analysis. Working Paper, 2016
- [11] R. German; K. Goetz; V. Grimm; A. Kufner; C. Leepa; M. Luther; S. Mehl; I. Sigert; D. Steber; K. Veerashekar. SWARM – Successful Provision Of Frequency Containment Reserve With Distributed Energy Storage Systems. Working Paper, 2015

7 Workshops

- [1] Workshop „Grundlagen der Netzmodellierung in Stromversorgungssystemen: Linearisierte Darstellung von Übertragungs- und Verteilnetzen“ (Dozent: Dr. Olav Krause, University of Queensland), EnCN/ZAE, an der FAU Nürnberg, 17.02.2014 - 18.02.2014
- [2] Workshop „Implementierung im Marktumfeld“ mit den Verteilnetzbetreibern, EnCN/ZAE, in Hof, 31.10.2014
- [3] Workshop „Speicherbetrieb: relevante rechtliche Rahmenbedingungen“, EnCN/ZAE, am EnCN Nürnberg, 15.12.2014
- [4] Workshop on Gas Transport and Gas Market Modeling, EnCN, am EnCN Nürnberg, 15.12.2014
- [5] Workshop zum Projekt SGS, EnCN/ZAE, am EnCN Nürnberg, 25.01.2016
- [6] Nürnberg-München Energy Workshop, ENCN/TU München/ifo Institut, am EnCN Nürnberg, 17.03.2016
- [7] Workshop „Strommarkt: Netzausbau und Marktdesign“, EnCN/DIW, am DIW Berlin, 27.04.2016
- [8] Workshop „Strommarktmodellierung an der FAU“, EnCN, am EnCN Nürnberg, 17.06.2016
- [9] Nürnberg-München Energy Workshop, ENCN/TU München/ifo Institut, an der TU München, 22.09.2016

8 Gutachten

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

ACCEPTANCE

BETEILIGTE GRUPPEN

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft

Projektbericht EnCN1

Das Teilprojekt ACCEPTANCE ist das kleinste EnCN-Projekt. Die zentrale wissenschaftliche Fragestellung konzentriert sich auf die Analyse der Berichterstattung über Energietechnologien und die energiepolitische Debatte sowie deren Folgen für die Bevölkerung. Diese „veröffentlichte Meinung“ ist der Rohstoff, aus dem „öffentliche Meinung“ entsteht. Die journalistische Arbeitsweise verhindert eine ungefilterte und unverzerrte Abbildung der (wissenschaftlichen) Realität. So richten sich die Bürger und damit letztlich auch die Entscheidungsträger nicht am Stand der Forschung aus, sondern an dem journalistischen Realitätssubstrat, wenn sie energierelevante Entscheidungen zu treffen haben. Für Technologieakzeptanz oder deren Gegenteil, dem Protest gegen Ansiedlung von energierelevanter Infrastruktur, stellt die Berichterstattung der Medien die Grundlage dar. Darüber hinaus analysiert das ACCEPTANCE die Bedeutung der Berichterstattung für die Entstehung relevanter Einstellung in der Bevölkerung.

1 Medienmonitoring und Akzeptanz

1.1 Überblick über die Arbeiten und Ergebnisse

Das Hauptziel des Projekts war es, den medialen Diskurs über Energiepolitik und Technologien zu analysieren. Aus kommunikationswissenschaftlicher Sicht ist dieser Diskurs der Schlüssel zum Verständnis gesellschaftlicher Akzeptanz der Energiewende und der damit verbundenen Maßnahmen. Üblicherweise befassen sich Inhaltsanalysen mit abgeschlossenen Ereignissen, so dass die Herausforderung hier darin lag, ein Instrument zu entwickeln, das sich auch auf zukünftige Berichterstattung anwenden lässt. Ebenso musste das Instrument offen sein für Fragestellungen, die zu Beginn der Analyse noch nicht bedacht wurden. Die Implementation erfolgte 2012. Im Rahmen der Kooperation mit der Universität Göteborg wurde der Ansatz übernommen und hat sich im internationalen Vergleich bewährt.

Es hat sich jedoch herausgestellt, dass eine klassische Medieninhaltsanalyse in diesem Ausmaß sehr personal- und damit kostenintensiv ist. Daher wurden Wege gesucht und gefunden, das Monitoring zu automatisieren. Hierzu wurden diverser Ansätze geprüft. Letztlich wurde das Softwarepaket Wordstat® ausgewählt. Nach einer längeren Einarbeitungs- und Prüfphase ist die automatische Codierung seit 2015 vollständig implementiert. Nicht nur lässt sich über dieses System eine sehr große Textmenge in kurzer Zeit analysieren, wichtiger noch ist, dass das Ergebnis sehr hoch mit der Erfassung durch menschlicher Codierer übereinstimmt.

Unser Medienmonitoring dokumentiert einen tief greifenden Wandel, den der mediale Diskurs in den letzten fünf Jahren durchlaufen hat. Während energiepolitische Fragen am Anfang des Beobachtungszeitraums ausgezeichnet geeignet waren, unterschiedliche redaktionelle Linien sichtbar zu machen, hat sich das Bild im März 2011 komplett gewandelt: Kernenergie wird auf beiden Seiten des politischen Spektrums in den Medien abgelehnt, während regenerative Energien spiegelbildlich an medialer Zustimmung gewonnen haben. Unterschiede in der Berichterstattung, die auf unterschiedliche ideologische Standpunkte zurückzuführen sind, lassen sich nur noch sehr schwer erkennen (vgl. Tabelle 9). Unsere Analyse zeigt aber auch, dass energiepolitische Fragen in der Berichterstattung eher am Rande vorkommen. Meist werden sie im Wirtschaftsteil oder unter wirtschaftlichen

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Christina Holtz-Bacha
Dr. Reimar Zeh
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Christina.Holtz-Bacha@fau.de
Reimar.Zeh@fau.de

Telefon
+49 911 / 5302 674
+49 911 / 56854 9129

Web
www.encn.de
<http://tinyurl.com/zuzdubt>

Gesichtspunkten diskutiert. Die Berichterstattung zu Energieträgern stellt Verbindungen zu Bevölkerungsprotesten oder Klimawandel her, insbesondere dann, wenn regenerative Energien oder fossile Energieträger behandelt werden. Die Kernproblematik der Energiewende, die wohl darin besteht, diskontinuierliche Stromproduktion und kontinuierliche Stromnachfrage zusammenzubringen, entweder über die Speicherung oder über den Ausbau des Stromnetzes, ist eher ein Randthema für die Presse (s. Abbildung 165).

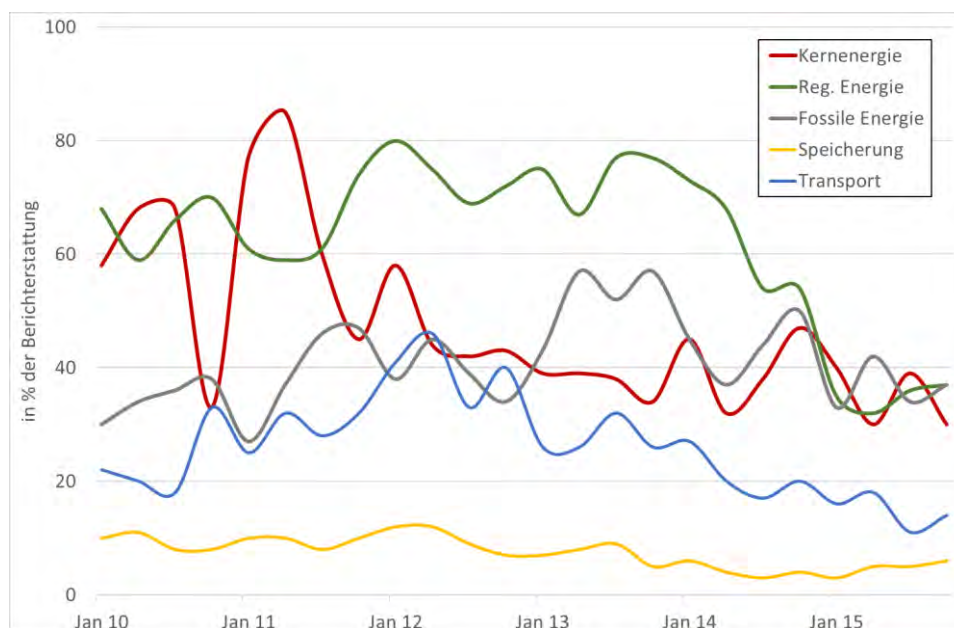


Abbildung 165: Die mediale Energiedebatte im Zeitverlauf

Durch die weitgehende Automatisierung des Medienmonitorings sind Ressourcen freigewordenen, die im Frühjahr 2016 für eine bundesweite Befragung zur Akzeptanz von Energietechnologien eingesetzt werden konnten.

Hierbei liegt das Akzeptanzmodell von Huijts et al. zu Grunde, das aber bisher stets auf sehr spezifische Technologien angewendet wurde und Medieneinflüsse außer Acht ließ. Unsere Studie untersucht Einflüsse auf die generelle Akzeptanz von Energietechnologien im unmittelbaren Umfeld der Befragten und geht dabei auch auf das viel diskutierte NIMBY-Problem ein. Obwohl Mediennutzung nicht direkt Akzeptanz erzeugt, wirkt sie in zweifacher Weise auf diese ein: Einerseits verbessert sich mit zunehmender Nutzung tagesaktueller Medien die Einstellung gegenüber Technik, andererseits nimmt das Vertrauen in Institutionen und Stakeholder im Energiesektor zu. Beides wiederum begünstigt die Bereitschaft der Ansiedlung von energierelevanten Infrastrukturen im unmittelbaren Wohnumfeld zuzustimmen.

Tabelle 9: Tenor und Themen der Berichterstattung.

	Kernkraft	Regen. Energie	Fossile Energie	Speicher	Transport
Anteil negativer Artikel	49%	58%	42%	8%	26%
Anteil positiver Artikel	48%	61%	44%	10%	28%
mit Bezug Klimawandel	46%	71%	66%	9%	24%
mit Bezug Protest	61%	55%	50%	11%	31%

1.2 Vorhandenes Personal im Projekt

Die im Projekt angesiedelte Mitarbeiterstelle ist Ende 2016 durchgehend besetzt. Darüber hinaus sind studentische Hilfskräfte im Projekt tätig.

1.3 Kooperation mit EnCN Partnern

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl EVT (Prof. Karl) und dem Department für Geographie der LMU wurde im Herbst des Jahres 2015 ein Projektantrag zum Thema SustainableGas beim BMWi erfolgreich eingereicht. Über dieses Projekt ist es nun auch AC-CEPTANCE gelungen, eine Drittmittelquote von 60% zu erreichen. Das Projekt ist im Frühjahr 2016 gestartet.

Ein Ende 2015 erarbeiteter efi-Antrag (FAU Emerging Fields Initiative) in Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Korpuslinguistik, Japanologie I und Graphische Datenverarbeitung ist nun ebenfalls positiv bewertet worden. Das Projekt beginnt mit dem kommenden Jahr. Die Kernfragestellung des Projektes beschäftigt sich mit dem Zusammenspiel sozialer und klassischer Medien im gesellschaftlichen Diskurs in Japan und Deutschland über das Reaktorunglück in Fukushima. Für den erfolgreichen Projektantrag war die im EnCN gewonnene Expertise ein wichtiges Element. Da sich bei den Mitteln im weiteren Sinne um Landesmittel handelt, können die Fördermittel in Höhe von ca. 85.000 € nicht als weitere Drittmittel geltend gemacht werden.

Ferner liefert ACCEPTANCE monatlich einen Pressespiegel über die Aktivitäten des EnCN und der ENERGIERegion Nürnberg an die EnCN-Geschäftsführung und an die ENERGIERegion unentgeltlich. Der Pressespiegel ist integraler Bestandteil der Außendarstellung des EnCN und seiner Marketingmaßnahmen.

1.4 Ausschöpfung der Fördermittel

Die vom Freistaat bewilligten Fördermittel sind Ende 2016 zu 96% abgeflossen und für die Projektarbeit verwendet worden. Nicht verbrauchte Restmittel werden zurückgegeben.

1.5 Ausblick auf weitere Tätigkeiten

Auch wenn das Projekt ACCEPTANCE im EnCN nun abgeschlossen ist, wird der Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft die Arbeit an der Energiethematik fortsetzen. Einerseits, im Kontext des SustainableGas-Projektes, das über den Lehrstuhl EVT direkt mit dem EnCN in Verbindung stehen wird. Andererseits spielen die im Medienmonitoring gemachten Erfahrungen und gewonnenen Kompetenzen für das efi-Projekt eine zentrale Rolle.

2 Schlussworte

Weder für die Medien noch für die Bevölkerung ist die Energiewende ein wichtiges Thema. Die Berichterstattung reduziert energiepolitischen Fragen häufig auf wirtschaftliche Aspekte und zeigt so den Bürgern lediglich einen begrenzten Problemausschnitt. Die tatsächliche Komplexität des Problems bleibt damit unsichtbar. Zwar zeigt unsere Bevölkerungsstudie, dass sich mit steigender Mediennutzung akzeptanzrelevante Einstellungen verbessern, aber sie zeigt auch, dass die Bevölkerung über ein sehr geringes Wissen über das Thema Energie verfügt. Daher sind Akzeptanzfragen vermutlich stärker von affektiven und weniger von kognitiven Komponenten geprägt. Es ist also wichtiger welche Gefühle sie mit der Energiewende verbinden und nicht was sie darüber wissen. Für Entscheidungen, die rational geprägt sein sollten, ist dies sicherlich nicht förderlich.

Vor diesem Hintergrund ist es bedauerlich, dass es ACCEPTANCE nicht gelungen ist, seinen Ansatz im EnCN 2.0 fortzuführen. Andererseits haben sich für das Projekt auch zu wenig Anknüpfungspunkte ergeben, die kommunikationswissenschaftlich relevant gewesen wären, so dass in den neuen Projekten die begrenzten Ressourcen des Lehrstuhls effizienter eingesetzt werden können.

3 Veröffentlichungen

- [1] Zeh, R. & Odén, T., Energieträger in der Berichterstattung. Die Nachwehen von Fukushima in Schweden und Deutschland In: Fukushima und die Folgen – Medienberichterstattung, öffentliche Meinung, politische Konsequenzen, J. Wolling und D. Arlt, Hrsg., Ilmenau: Universitätsverlag TU Ilmenau, 2014, S. 211-232



Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

BETEILIGTE GRUPPEN

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Materialien der Elektronik und der Energietechnologie)

Projektbericht EnCN1

Die Forschungsgruppe um die W2 Stützprofessur von Wolfgang Heiss beschäftigt sich seit seinem Dienstantritt im September 2014 mit lösungsprozessierten Halbleitermaterialien als Ausgangsmaterial für verschiedene elektronische Anwendungen. Der Fokus der Arbeiten liegt auf kolloidalen Nanokristallen, die aus rein anorganischen, aus rein organischen, als auch aus organisch-anorganischen Hybridmaterialien hergestellt werden und deren Funktionalisierung mit speziell gewählten Liganden. Beispiele für die hergestellten Materialien inkludieren Quantenpunkte aus infrarot absorbierenden Halbleitern, Nanokristalle aus Metall-Halid Perovskiten, oder auch organische Pigment Nanostrukturen mit bio-inspirierten Formen. Im Fokus der Anwendungen stehen neben der Photodetektion im Infraroten-Spektralbereich auch die photoelektrochemische Katalyse zur Herstellung von Treibstoffen als auch bioelektronische Systeme, zur selektiven Anregung von Zellen. Als Forschungs-Highlight wurden 2015 erste Röntgendetektoren vorgestellt, die aus lösungsprozessierten Metall-Halid Perovskiten hergestellt worden sind.

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr. Wolfgang Heiss
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Wolfgang.Heiss@fau.de

Telefon
+49 911 / 56854 9216

Web
www.encn.de

1 Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien

1.1 Lösungsprozessierte Materialien zur Photon-Detektion

Für die Detektion von Photonen werden Bauteile entwickelt, die ähnlich wie Solarzellen aufgebaut sind, mitunter aber auf aktive Materialien zurückgreift, deren Absorptionsvermögen sich nicht auf den sichtbaren Spektralbereich beschränkt. Neben Photodioden werden auch photoleitende Bauteilarchitekturen eingesetzt, die einfacher aufgebaut sind, dafür aber mit einer externen Spannung versorgt werden müssen und höhere Dunkelströme aufweisen. Das Ziel der Arbeitsgruppe um die W2 Stützprofessur ist es, Photodetektoren für verschiedenste Spektralbereiche zu entwickeln, welche einfach und kostengünstig herstellbar sind und dabei trotzdem hohe Nachweisempfindlichkeiten aufweisen.

Für eine Weiterentwicklung druckbarer Elektronik wurde eine elektronische Tinte aus infrarot absorbierenden PbS Nanokristallen entwickelt. Das Problem konventioneller Nanokristall-Lösungen für Anwendungen in der Elektronik ist die Ummantelung der einzelnen Nanokristalle mit organischen Liganden, welche elektrische Isolatoren darstellen. In der Literatur werden deshalb eine ganze Reihe von alternativen Liganden aufgezeigt, welche angewendet werden können, um Nanokristallfilme mit verbesserten elektrischen Eigenschaften herzustellen. Ein Hauptproblem dieser Liganden ist meist, dass diese in den Nanokristallbauteilen auch als unerwünschte elektronische Defekte wirken. Von uns wurden deshalb Liganden synthetisiert, welche die Nanokristalle nicht nur einhüllen und dabei elektrisch leitfähig sind, sondern auf der Nanokristall Oberfläche so kristallisieren, dass sie das Kristallgitter der Nanokristalle nahezu fehlerfrei fortsetzen. Diese Liganden formen eine epitaktische Hülle um den Nanokristall-Kern. Die dazu gewählten Liganden sind oktaedrisch geformte Metall-Halid Cluster, mit interatomaren Bindungslängen, die denen im Nanokristall-Kern entsprechen. Diese Cluster können auch als nulldimensionalen Metall-Halid-Perovskite bezeichnet werden, welche sehr günstige elektronische Eigenschaften aufweisen. Diese Cluster ersetzen innerhalb weniger Sekunden die organischen Liganden im Rahmen eines Phasentransfers der Nanokristall von einem nicht-polarem organischen Lösungsmittel in ein polares Lösungsmittel. Die daraus entstehende kolloidale Lösung kann mittels Tintenstrahldruckens appliziert werden. Von uns wurden damit Photoleitungsbauteile demonstriert deren einzelnen Komponenten, inklusive der Elektroden ausschließlich mittels Tintenstrahldruckens hergestellt worden sind (Abbildung 166). Obwohl diese Bauteile aufgrund des limitierten Auflösungsvermögens

des Tintenstrahldruckens unüblich große Elektrodenabstände aufweisen, zeigen diese hohe Detektivitäten, gepaart mit sehr geringen Dunkelströmen, was deren Anwendbarkeit sicherlich zu Gute kommen wird.

Zu dieser Entwicklung der epitaktischen Ligandenschalen hatte es zunächst auch einige Vorarbeiten gegeben, die sich mit funktionellen Liganden befasst haben. So wurde 2014 die Manipulation der Ladungsträgerkonzentration von kolloidalen Nanokristallen, über einen Austausch ihrer Oberflächenmoleküle, studiert. Als Beispiel dafür wurde die plasmonische Absorption in halbleitenden CuSe Nanokristallen, die aufgrund einer hohen Eigendotierung im nahen infraroten Spektralbereich zu finden ist, über einen Ligandenaustausch moduliert. Dabei wurden extra Ladungen auf die Nanokristalle aufgebracht, oder auch Ladung abgeführt. Über diese Ladungsträgerkontrolle konnte die infrarote Absorption der Nanokristalle eingestellt werden. Dieser Effekt könnte in weitere Folge in intelligenten Fenstern zur Kontrolle des Transmissionsverhaltens eingesetzt werden.

Eine zweite Vorarbeit zu den epitaktischen Ligandenschalen hatte sich mit inorganischen Metal-Chalcogenid-Clustern beschäftigt, welche sich auch für die Passivierung von PbS Nanokristallen eignen. Während mit diesem Materialsystem auch sehr empfindliche Photodetektoren demonstriert werden konnten, wurde für diese allerdings auch eindeutig nachgewiesen, dass der hohe Photoleitungsresponse auf Defektzustände zurückzuführen ist, welche die Bauteile äußerst langsam machen. Deshalb kommen diese Photodetektoren für Anwendungen nur eher beschränkt in Frage.

Als Forschungshighlight hat die Arbeitsgruppe im Jahr 2015 organisch-anorganische Metall-Halid-Perovskite für die Röntgendetektion demonstriert. Während diese Materialien zu diesem Zeitpunkt bereits für eine Vielzahl von Bauteilen herangezogen worden sind, machen die in den Metall-Halid-Perovskiten enthaltenen schweren Elemente diese zu idealen Absorbieren für hochenergetische Strahlung. Getestet wurde der Response von photoleitenden als auch photovoltaischen Bauteile. Dabei wurden hohe Röntgen zu Photostrom Konversionsraten erzielt als auch ausreichende Stabilitäten, um mit diesen Detektoren erste Röntgenbilder aufzunehmen. Der Vorteil der Metall-Halid-Perovskite gegenüber konventionellen Halbleiter wie Silizium ist, dass die Bauteile um eine Größenordnung dünner sein dürfen um gleich viel Röntgenlicht zu detektieren. Deshalb konnten die Bauteile z. B. mittels Sprühbeschichtung hergestellt werden, während Siliziumbauteile aus einem Volumenkristall geschnitten werden müssen. Die Idee lösungsprozessierte Metall-Halid-Perovskite für die Detektion hochenergetischer Strahlung einzusetzen wurde mittlerweile weltweit von mehreren Gruppen aufgegriffen. Basierend auf den Vorarbeiten am EnCN wurden vor allem voluminösere Einkristall-Detektoren entwickelt, welche bessere Eigenschaften aufweisen als die ersten EnCN Prototypen. Dafür können diese verbesserten Bauteile aber nicht mehr über einfache Druckprozesse hergestellt werden, so wie es am EnCN gezeigt worden ist, sondern aus Einkristallen, ähnlich wie die Bauteile aus Silizium.

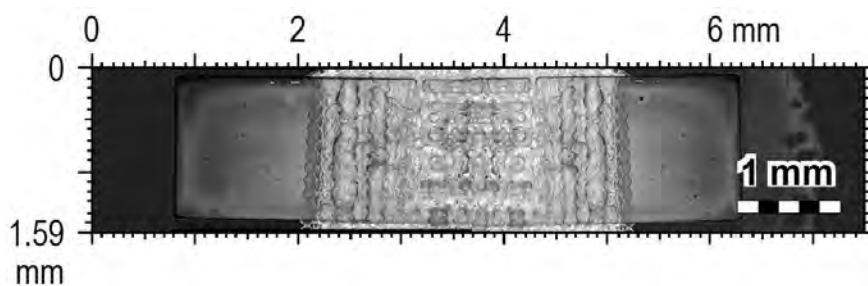


Abbildung 166 Gedruckter Photoleitungsdetektor bestehend aus zwei Silberelektroden, einer Zwischenschicht aus ZnO und den PbS Nanokristallen, die mit epitaktischen Liganden ummantelt sind (©FAU/i-MEET)

1.2 Wasserstoffgebundene organische Pigmenthalbleiter

Als zweites Standbein befasst sich die Gruppe um die W2 Stützprofessur mit Halbleitersystemen die auf wasserstoffgebundenen organischen Pigmenten basieren. Beispiele für solche Pigmente sind das hinlänglich bekannte Quinacridone, welches in verschiedensten rot-magenta Schattierungen in Pulverform am Markt ist und für das Färben von Plastik, oder auch für das Lackieren von Autos eingesetzt wird. Außerdem findet man Quinacredone üblicherweise in den Kartuschen von Farbdruckern, welche allerorts zu finden sind. Aufgrund seiner Energielücke im sichtbaren Spektralbereich kann Quinacredone nicht nur als Farbstoff, sondern auch als Halbleiter angesehen werden, der, wenn in ausreichender Reinheit abgetrennt, auch interessante elektronische Eigenschaften aufweist. In diesem Zusammenhang haben wir 2016 zu einer wissenschaftlichen Arbeit beigetragen, in der Quinacredone und einer seiner Verwandten, Epindolidione, als Elektrodenmaterial in Photoelektrochemischen Zellen eingesetzt worden sind. In diesen Zellen wurde unter konstanter Beleuchtung der im Wasser gelöste Sauerstoff zu einem hochenergetischen Treibstoff, nämlich Wasserstoffperoxid reduziert. Die organischen Pigment-Elektroden waren dabei überraschend stabil und arbeiteten für mindestens 2 Wochen in Wasser mit kontrollierten pH-Werten zwischen 1 und 12. Interessanterweise lieferten die organischen Pigmentelektroden dabei im Vergleich zu vorher berichteten Materialien um ein bis zwei Größenordnungen höhere photokatalytische Aktivitäten, gemessen in Peroxidgeneration pro Gewicht des eingesetzten Katalyten, pro Zeit. Darüber hinaus wurde noch festgestellt, dass Epindolidione, das bei höheren Energien absorbiert als das Quinacridone nicht nur Wasserstoffperoxid erzeugt, sondern aus Wasser auch eine geringe Menge an Wasserstoff. Da Wasserstoffperoxid bei der Verbrennung lediglich

Wasser als „Abgas“ liefert, wird es als Raketentreibstoff eingesetzt, welches mit der von uns gezeigten Photokatalyse in Zukunft auch auf einem umweltfreundlichen Weg hergestellt werden könnte.

Neben den Volumeneigenschaften von Halbleitern spielen für die Photokatalyse vor allem deren Oberflächen eine große Rolle. Deshalb haben wir aus Quinacridone hierarchische Nanokristall-Architekturen entwickelt, welche besonders hohe Oberflächen/Volumen Verhältnisse aufweisen. Je nach gewähltem Syntheseweg haben diese Teilchen Formen die in der Natur auch beobachtet werden. So erinnert das Aussehen der Nanokristall-Architekturen an Igel, an Agaven, oder auch an Algen, welche jeweils aus dünnen Nadeln, aus Blättern oder auch Dolchen bestehen, die sich in Kugeln zusammenhäufen (Abbildung 167). Elektroden aus Igelförmigen-Quinacridone Teilchen wurden in photoelektrochemischen Zellen getestet und diese haben dabei eine zehnfach höhere photokatalytische Reaktivität gezeigt als aufgedampfte dünne Filme.

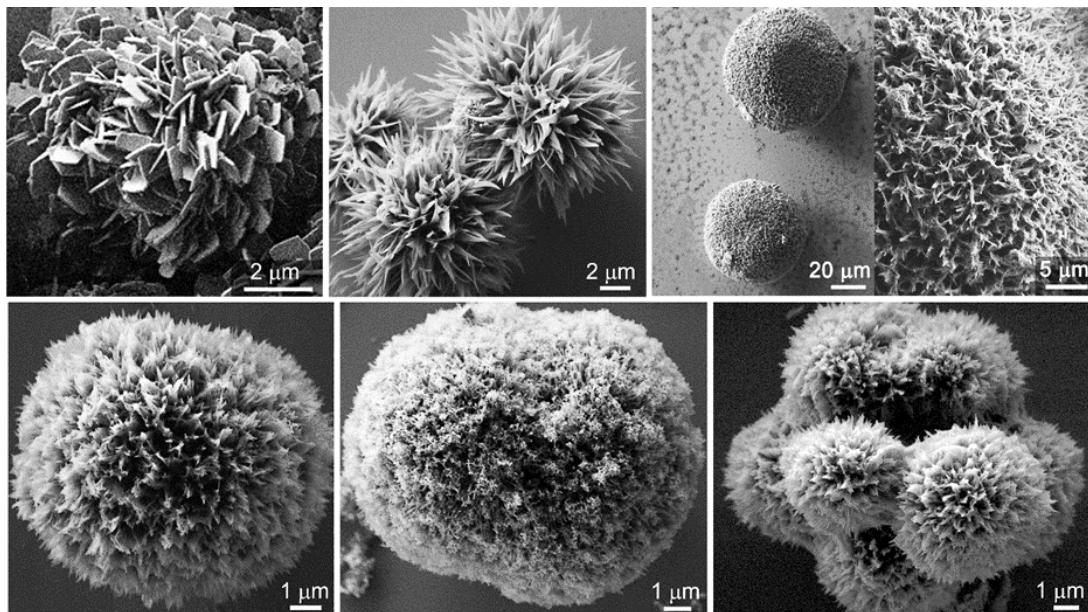


Abbildung 167: Hierarchische Mikro-Nanostrukturen aus Quinacridone mit unterschiedlichen Formen (©FAU/i-MEET)

2 Schlussworte

Lösungsprozessierte Halbleitermaterialien ermöglichen das Drucken von Halbleiterbauelementen, als kostengünstige und einfache Alternative zu den konventionellen Strukturierungsmethoden, die industriell angewandt werden. Die W2 Professur am EnCN befasst sich vorwiegend mit kolloidalen Nanokristallen mit interessanten optischen und elektronischen Eigenschaften, die auch in der Photokatalyse eingesetzt werden können. Als Materialsysteme für die Nanokristalle werden nicht nur traditionelle anorganische Verbindungshalbleiter gewählt, sondern auch organische Pigmente, die in der Industrie als Färbemittel eingesetzt werden. Entwickelt wurden unter anderem neuartige, kristalline Ligandenschalen für photoleitende Nanokristall-Materialien und organische-Pigment Nanokristallstrukturen, deren Anwendungsgebiete noch nicht gänzlich geklärt sind. Darüber hinaus wurden auch erste Bauteile aus Perovskit-Halbleitern für die Röntgendetektion demonstriert. Diese neuen Entwicklungen sollen in Verbundprojekten auch mit industriellen Partner weiter getrieben werden.

3 Veröffentlichungen

- [1] D. Kriegner, M. Sytnyk, H. Groiss, M. Yarema, W. Grafeneder, P. Walter, A. C. Dippel, M. Meffert, D. Gerthsen, J. Stangl, W. Heiss. Galvanic Exchange in Colloidal Metal/Metal-Oxide Core/Shell Nanocrystals. *J. of Phys. Chem. C*, 120, 19848-19855, 2016
- [2] M. Jakesova,, D. H. Apaydin, M. Sytnyk, K. Oppelt, W. Heiss, N. S. Saraciftci, E. D. Glowacki, Hydrogen-Bonded Organic Semiconductors as Stable Photoelectrocatalysts for Efficient Hydrogen Peroxide Photosynthesis, *Adv. Funct. Mat.* 26, 5248-5254, 2016
- [3] W. Heiss, C. Brabec, X-RAY IMAGING: Perovskites target X-ray detection. *Nature Photonics* 10, 288-289, 2016

- [4] C. Gollner, J. Ziegler, L. Protesescu, D. N. Dirin, R. T. Lechner, G. Fritz-Popovski, M. Sytnyk, S. Yakunin, S. Rotter, A. A. Y. Amin, C. Vidal, C. Hrelescu, T. A. Klar, M. V. Kovalenko, W. Heiss, ACS Nano, Random Lasing with Systematic Threshold Behavior in Films of CdSe/CdS, ACS Nano, 9, 9792-9801 (2015)
- [5] V. Derek, E. D. Glowacki, M. Sytnyk, W. Heiss, M. Marcius, M. Ristic, M Ivanda, N. S. Sariciftci, Enhanced near-infrared response of nano- and microstructured silicon/organic hybrid photodetectors. Appl. Phys. Lett. 107, 083302, 2015
- [6] S. Yakunin, L. Protesescu, F. Krieg, M. I. Bodnarchuk, G. Nedelcu, M. Humer, G. De Luca, M. Fiebig, W. Heiss, M. V. Kovalenko, Low-threshold amplified spontaneous emission and lasing from colloidal nanocrystals of caesium lead halide perovskites, Nature Comm. 6, 8056, 2015
- [7] S. Yakunin, M. Sytnyk, D. Kriegner, S. Shrestha, M. Richter, G. J. Matt, H. Azimi, C. J. Brabec, J. Stangl, M. V. Kovalenko, W. Heiss, W, Detection of X-ray photons by solution-processed lead halide perovskites, Nature Photonics 9. 444, 2015
- [8] M. V. Kovalenko, L. Manna, A. Cabot, Z. Hens, D. V. Talapin, C. R. Kagan, V. I. Klimov, A. L. Rogach, P. Reiss, D. J. Milliron, P. Guyot-Sionnest, G. Konstantatos, W. J. Parak, T. Hyeon, B. A. Korgel, C. B. Murray, W. Heiss. Prospects of Nanoscience with Nanocrystals, ACS Nano9, 1012-1057, 2015
- [9] T. Lenz, M. Richter, G. J. Matt, N. A. Luechinger, S. C. Halim, W. Heiss, C. J. Brabec, Charge transport in nanoparticulate thin films of zinc oxide and aluminum-doped zinc oxide. J. of Mat. Chem. C, 3, 1468-1473, 2015
- [10] S. Yakunin, D. N. Dirin, L. Protesescu, M. Sytnyk, S. Tollabimazraehno, M. Humer, F. Hackl, T. Fromherz, M. I. Bodnarchuk, M. V. Kovalenko, W. Heiss. Infrared Photoconductivity in Films of Arsenic-Sulfide-Encapsulated Lead-Sulfide Nanocrystals. ACS Nano 8, 12883-12894, 2014
- [11] M. Sytnyk, E. D. S. Yakunin, G. Voss, W. Schofberger, D. Kriegner, J. Stangl, R. Trotta, C. Gollner, S Tollabimazraehno, G Romanazzi, Z Bozkurt, M. Havlicek, N. S. Sariciftci, W. Heiss, W. Hydrogen-Bonded Organic Semiconductor Micro- And Nanocrystals: From Colloidal Syntheses to (Opto-) Electronic Devices. JACS, 136, 16522-16532, 2014
- [12] O. A. Balitskii, M. Sytnyk, J. Stangl, D. Primetzhofer, H. Groiss, W. Heiss, Tuning the Localized Surface Plasmon Resonance in Cu₂-xSe Nanocrystals. ACS Appl. Mat. & Interfaces, 6, 17770-17775, 2014

Professur Energieeffiziente Produktionstechnologien

BETEILIGTE GRUPPEN

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Projektbericht EnCN1

Das Projekt „Energieeffiziente Produktionstechnologien“ im Energie Campus Nürnberg wurde durch den Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg bearbeitet. Ziel des Projekts war die integrative Betrachtung des Energieverbrauchs über gesamte Produktlebenszyklen hinweg. Dazu wurden in den Jahren 2012-2016 Projekte bzgl. der Verbesserung der Transparenz über Energieverbräuche im Unternehmen bearbeitet und aufbauend auf deren Ergebnissen weiterführende Arbeiten durchgeführt. Hauptziel hierbei war die Konzipierung und Implementierung von softwarebasierten Werkzeugen zur Verarbeitung, Visualisierung und Weiternutzung des neu gewonnenen Wissens im Shopfloor. Die Arbeiten unterstützten dabei auch die Forschungsaktivitäten der Green Factory Bavaria auf dem Gebiet der Energieeffizienz in der Produktion mit dem Ziel des interdisziplinären Informationsaustauschs zwischen den Projekten.

1 Professur

Im Rahmen des Projekts „Energieeffiziente Produktionstechnologien“ wurde mit verschiedenen Partnern aus Industrie und Forschung zusammengearbeitet. Dazu gehören die Partner des EnCN sowie im Rahmen der Green Factory Bavaria Professuren an verschiedenen Universitäten und Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Bayern wie beispielsweise in Ansbach, Amberg-Weiden, Coburg, Hof und Schweinfurt-Würzburg.

Die während der Projektlaufzeit fokussierten Forschungsarbeiten beziehen sich auf die optimale Nutzung des neu gewonnenen Wissens über Energieverbräuche in der Fabrik und insbesondere auf deren verbesserte Verarbeitung und Visualisierung. Dabei werden die Mitarbeiter sowohl im Shopfloor als auch im gesamten Unternehmen bei der Nutzung neuer Ansätze durch die Einführung von Softwaresystemen für Energie- und Wissensmanagement unterstützt. Im Folgenden werden wesentliche Forschungsarbeiten und dabei erzielte Ergebnisse vorgestellt.

1.1 Kontaktloses Laden

Für eine flächendeckende Verbreitung kontaktloser Energieübertragungssysteme sind zuverlässige und effiziente Fertigungsprozesse und -abläufe unabdingbar. Zur Untersuchung der Fertigungsgerechtigkeit der Systeme ist deshalb der Lehrstuhl FAPS der FAU intensiv eingebunden, welcher über umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Fertigungssysteme und beteiligten Materialien sowie deren Handhabung verfügt. Neben geeigneten Produktionsprozessen werden überdies unterschiedliche Materialien auf ihre elektrische, mechanische und chemische Eignung überprüft und deren Auswirkungen auf die Qualität der Energieübertragung getestet. Zu diesem Zweck wurde ein standardisierter Prüfprozess entwickelt, mittels dessen die Auswirkungen der Variation verschiedener Material-, Fertigungs- und Prozessparameter an definierten Referenzsystemen quantifiziert und so vorhandene Potentiale identifiziert und gehoben werden können. Der Bedarf fertigungstechnischer Untersuchungen wurde dabei aus dem direkt benachbarten (Fraunhofer IISB) wie auch internationalen Forschungsumfeld sowie aus den bereits vorhandenen Industriekontakten ermittelt. Zudem wurden die aus Fertigungssicht relevanten Parameter durch die Auswertung unterschiedlicher Topologie- und Produktionsszenarien identifiziert.

Daneben sollten die gewonnenen Erkenntnisse direkt in das Prozessdesign einfließen, wobei das Augenmerk von vornherein auf eine gute Automatisierbarkeit der Fertigungsstrukturen gelegt wurde, so dass die Ergebnisse mittel- und langfristig für die Gestaltung effizienter, zuverlässiger und innovativer Prozessketten genutzt werden können. Angesichts der trotz voranschreitender

KONTAKT PROJEKT-KOORDINATOR

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



E-Mail
Joerg.Franke@faps.fau.de

Telefon
+49 9131 / 85 27569

Web
www.encn.de

Standardisierung verbleibenden Design-Freiheiten in Bezug auf die Spulengeometrien ergibt sich eine Vielzahl an potentiellen Einflussfaktoren durch die Fertigungsprozesse. Zur Untersuchung der Fertigungsgerechtigkeit der Systeme wurden daher unterschiedliche Fertigungszellen und Verlege-Methoden entwickelt, um die für die Ladesysteme erforderlichen Hochfrequenz(HF)-Litzen zu verarbeiten (s. Abbildung 168). Zur Gewährleistung der in den ersten Schritten notwendigen Fertigungsflexibilität bei der Verarbeitung der sensiblen Materialien wurden roboter-basierte Systeme eingesetzt. Hierbei kamen HF-Litzen mit einigen Hundert einzeln isolierten Leitern zum Einsatz, die aufgrund des vorliegenden inneren und äußeren Proximity- bzw. Skin-Effektes bei operativen Frequenzen deutlich über 20 kHz erforderlich sind. Dies hat zusätzliche Vorteile für einen zügigen Aufbau unterschiedlicher Prozessvarianten, um das Materialverhalten bei unterschiedlichen Verlegeparametern (Gestaltung der Zuführung der HF-Litzen in den Prozess, Radien in den Verlegewerkzeugen etc.) studieren und analysieren zu können, und potentielle Schäden in den sensitiven Litzen-Materialien zu detektieren bzw. zu vermeiden. Ein weiteres Einsatzfeld roboter-basierter Systeme ist die Realisierung auch komplexer bipolarer Spulenstrukturen, wie in Abbildung 168 zu sehen.

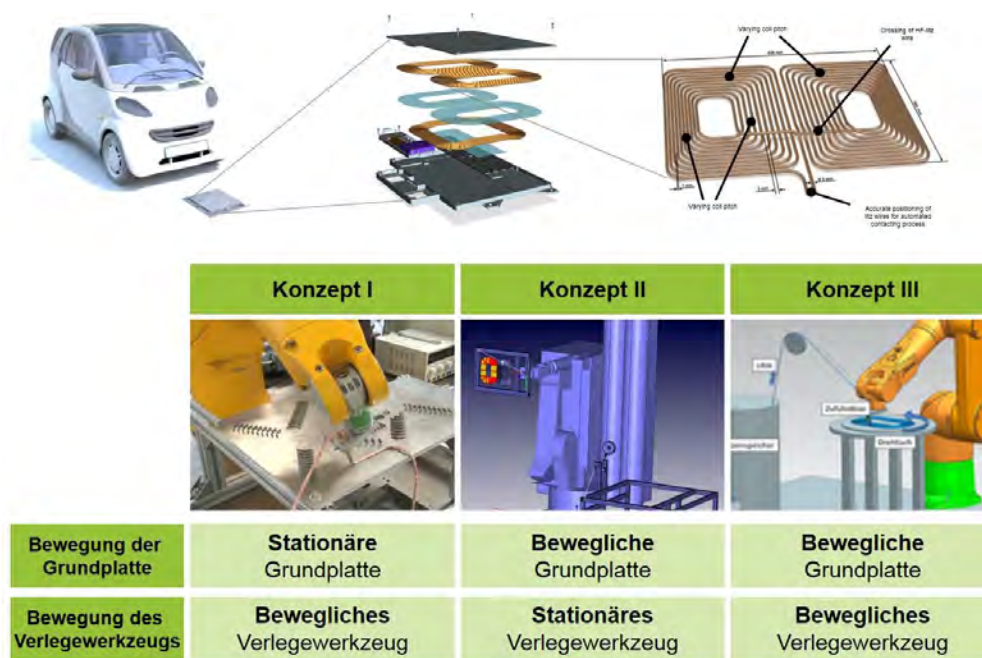


Abbildung 168: Roboter-basierte Verlegeverfahren für HF-Litzen ermöglichen die Fertigung komplexer Spulengeometrien zur induktiven Ladung von Elektrofahrzeugen

Die Verlegeanalysen zeigen dabei deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Aufbauvariante der HF-Litzen (Isoliervarianten wie Naturseide, Backlack, Mylar etc.) und der durch die Pad-Topologie bestimmten Radien. In weiteren Schritten wurde eine Energiekette in die Prüfstandskinematiken integriert. Damit können die Einflüsse der Verlegevarianten unmittelbar auf die elektrischen Funktionsparameter übertragen werden. Hierfür wurden unterschiedliche Spulensysteme mit unterschiedlichen Materialien (Einbezug von Al-, und CCA / copper-clad aluminium-HF-Litzen) aufgebaut. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einen Richtlinien-Katalog für einen fertigungs-gerechten Aufbau von induktiven Ladesystemen überführt.

1.2 Flexibles Messsystem und Baustein zur Energiesimulation

Die Entwicklung eines flexiblen Messsystems zur Aufnahme des Energieverbrauchs von Anlagen verfolgt das Ziel, Transparenz über Energieverbräuche in der Produktion zu schaffen. Dazu wird modernes Mess-Equipment (z.B. Sentron PAC für die elektrische Energie) an einen OPC UA Server angebunden und kann dadurch über verschiedenste Geräte abgerufen und anschließend weiterverarbeitet werden. Das entwickelte Messsystem wird inzwischen im Rahmen verschiedener Projekte eingesetzt.

Aufbauend darauf wurde eine Energiesimulation konzipiert, welche die Verbräuche von Produktionsanlagen und -linien prognostiziert. Die Anwendung ist als Add-on der Materialflusssimulationssoftware Tecnomatix PlantSimulation implementiert und erlaubt eine betriebsbegleitende Vorhersage und Visualisierung des Energieverbrauchs für verschiedene Produktionsszenarien. Damit können die Optimierungsmaßnahmen quantitativ bezüglich des zu erwartenden Energieverbrauchs bewertet werden, so dass die Auswirkungen unterschiedlicher Produktionsplanungsstrategien untereinander vergleichbar sind.

1.3 Simulation von Energieverbräuchen mechatronischer Systeme

An die Ergebnisse zur Transparenz von Energieverbräuchen schließen sich Arbeiten zur Simulation des Energieverbrauchs an. Dabei werden mit Hilfe von Multiphysics-Ansätzen mechatronische Systeme in der Produktion umfänglich beschrieben und ihr Energieverbrauch simulativ bewertet. Eine Beispielanwendung fokussiert sich hier auf die Modellierung eines 6-achsigen Industrieroboters mit Hilfe von Modelica. Bereits veröffentlichte Ergebnisse zeigen, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsmodell und realer Anwendung vorliegt. Um den Anwendungsbereich der entwickelten Methode zu erweitern, wurde zudem ein Energiemodell eines kartesischen Roboters entworfen. Neben dem Energie-Monitoring kann das Modell auch dafür eingesetzt werden, die Kinematik und das dynamische Verhalten der Maschine zu analysieren, siehe Abbildung 169. Dadurch können sowohl Kosten als auch Zeit bei der Entwicklung energieeffizienter Handhabungssysteme eingespart werden. Somit kann durch den Einsatz der entwickelten Methode bei der Planung eines Handhabungssystems der Energieverbrauch bei gleichzeitiger Steigerung der Leistung der Maschine gesenkt werden.

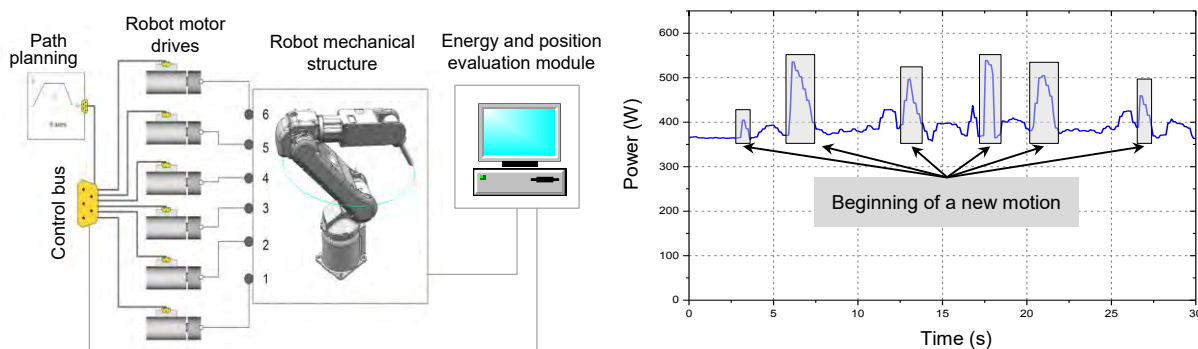


Abbildung 169: Vorgehensweise zur Anwendung des Energiemodells (links) und resultierende Statuserkennung im Energieprofil (rechts).

1.4 Energiemanagementsystem

Ein weiteres Forschungsfeld im Bereich der energieeffizienten Produktionstechnologien ist der Aufbau von Energiemanagementsystemen in den Unternehmen. Die Einführung eines Energiemanagementsystems ist insbesondere für energieintensive Unternehmen zentrale Voraussetzung für eine Befreiung von der EEG-Umlage. Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurden daher Konzepte zur Einführung eines Energiemanagementsystems erarbeitet und webbasierte Softwarewerkzeuge zur Schaffung einer möglichst hohen Transparenz über den Energieverbrauch insbesondere in der Produktion prototypisch entwickelt.

Ein Hindernis bei der transparenten Darstellung der Energieverbräuche und –kosten am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik war bislang das Fehlen eines Systems zur Auswertung und Visualisierung erfasster Energieverbrauchsdaten. Aufbauend auf der bereits eingesetzten Hardware zur Leistungserfassung wurde daher ein Konzept entwickelt, welches zum einen die optimale Nutzung der Energiemanagementsoftware wiedergibt und zum anderen eine strukturierte Vorgehensweise zur Umsetzung von energetischen Verbesserungspotenzialen aufweist. Wissenschaftlich gestützt wurden die Realisierungsvorschläge dabei durch das aus der weltweit gültigen Norm ISO 50001 bekannte Modell eines Energiemanagementsystems.

1.5 Wissensmanagement für Energieeffizienzthemen

Zur effizienten Vernetzung von Mitarbeitern hinsichtlich Themen der Ressourcen- und Energieeffizienz dient die Implementierung eines webbasierten Kommunikations- und Wissensmanagement-Portals. Dem Anwender wird damit ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dem er Lösungsalternativen für spezifische Problemstellungen der gesamten Community (z.T. auch über die Grenzen der Unternehmen hinaus) zur Verfügung stellen kann. Das Portal ist als webbasierte Plattform implementiert, auf der Anwendungen und Werkzeuge zur Kommunikation und zum Wissens- und Projektmanagement nutzbar sind. Dadurch kann erreicht werden, dass das entstandene Wissen über technische Lösungen und Methoden zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz nachhaltig in die industrielle Praxis transferiert wird.

Zur tieferen Verankerung der Energieforschung in der Produktion war es zudem Aufgabe des Projekts, die Aktivitäten der Green Factory Bavaria zu unterstützen. Dazu wurde in mehreren Workshops das Konzept der Green Factory Bavaria weiterentwickelt und die Basis für neue Forschungsprojekte gelegt. Zum Aufgabenumfang gehörte hier zusätzlich die Akquisition weiterer Forschungspartner. Für eine effektive Bearbeitung der aufgezeigten Entwicklungsfelder ist eine bayernweite und fachübergreifende Vorgehensweise zwingend erforderlich. Nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachdisziplinen können die kom-

plexen Fragestellungen erfolgreich gelöst werden. Dazu wurden, wie in Abbildung 170 dargestellt, in mehreren Treffen und Workshops zusammen mit den Mitarbeitern der Green Factory Bavaria Erfahrungen und Wissen (z.B. im Bereich Messequipment) ausgetauscht und gemeinsam an Lösungen gearbeitet.



Abbildung 170: Workshop mit der Green Factory Bavaria zum Thema Messequipment.

2 Schlussworte

Das Projekt wurde in den Jahren 2012-2016 durch zwei wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik bearbeitet. Die Arbeit an den genannten Forschungsthemen wurde zudem durch verschiedene studentische Arbeiten unterstützt. Zentrale Arbeitsergebnisse wurden in einschlägigen Fachzeitschriften und auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt.

Die entwickelten Methoden und Lösungen zur Integration der Thematik Energie in die bestehenden Workflows der Unternehmen sowie zur simulativen Betrachtung von Energieverbräuchen und der Konzeption und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen leisten einen zentralen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz im industriellen Umfeld. Die Arbeiten sollen im Rahmen der Green Factory Bavaria weitergeführt und intensiviert werden.

3 Veröffentlichungen

- [1] Paryanto, P.; Brossog, M.; Kohl, J.; Merhof, J.; Spreng, S.; Franke, J.: Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system, *Procedia CIRP*, Vol. 23, 131–136 (2014)
- [2] Spreng, S.; Kohl, J.; Proshkovsky, P.; Franke, J.: Simulation Based Evaluation of Energy Saving Potentials in the Field of Electric Drives Manufacturing, *Applied Mechanics and Materials: Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production*, Vol. 805, 67–72 (2015)
- [3] Rackow, T.; Kohl, J.; Canzaniello, A.; Schuderer, P.; Franke, J.: Energy Flexible Production: Saving Electricity Expenditures by Adjusting the Production Plan *Procedia CIRP* 26, 235-240 (2015)
- [4] Paryanto; Brossog, M.; Bornschlegl, M.; Franke, J.: Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78 (5-8), 1315-1328 (2015)
- [5] Brandmeier, M.; Rummler, K.; Brossog, M.; Franke, J. (2015): Green Energy Management Portal - Knowledge and Project Management for Energy Efficiency Projects. *Applied Mechanics and Materials: Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production*, Vol. 805, 38–45 (2015).
- [6] Javied, Tallal; Rackow, Tobias; Stankalla, Roland; Sterk, Christian; Franke, Jörg (2016): A Study on Electric Energy Consumption of Manufacturing Companies in the German Industry with the Focus on Electric Drives. In: *Procedia CIRP* 41, S. 318–322. DOI: 10.1016/j.procir.2015.10.006.
- [7] Paryanto, Brossog M., Roppelt M., Franke J.: A Model-based approach for the energy monitoring of handling machines. *Appl. Mech. Mater.* 856, 57-63 (2017).

Vorträge und Poster

SOLARFABRIK DER ZUKUNFT

- [1] P. Maisch, K.C. Tam, L. Lucera, F.W. Fecher, H.-J. Egelhaaf, H. Scheiber, et al., Inkjet Printing of Semitransparent Electrodes for Photovoltaic Applications, in: SPIE Opt. + Photonics, San Diego/USA, 2016.
- [2] P. Maisch, K.C. Tam, F.W. Fecher, H.-J. Egelhaaf, H. Scheiber, E. Maier, et al., Inkjet printing of highly conductive nanoparticle dispersions for organic electronics, in: MID-Congress, Würzburg/Germany, 2016.
- [3] P. Maisch, K.C. Tam, L. Lucera, P. Kubis, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, Scalable organic solar module fabrication— a comparison of digitally printed and LASER patterned interconnects, in: MRS Fall Meet. Boston/USA, 2016.
- [4] K.C. Tam, P. Maisch, L. Lucera, H.-J. Egelhaaf, H. Scheiber, E. Maier, et al., Inkjet printed silver nanowire electrodes for visually non-obstructive and efficient semitransparent organic solar cells and modules, in: ICFPE, Yonezawa/Japan, 2016.
- [5] K.C. Tam, P. Maisch, L. Lucera, H.-J. Egelhaaf, C.J. Brabec, Inkjet printed silver nanowire electrodes for visually non-obstructive and efficient semitransparent organic solar cells and modules, in: MRS Fall Meet. Boston/USA, 2016.
- [6] A. Solodovnyk, C. Kick, A. Osvet, H.-J. Egelhaaf, E. Stern, M. Batentschuk, et al., Computational Optimization and Solution-Processing of Thick and Efficient Luminescent Down-Shifting Layers for Photovoltaics, in: SPIE Photonics West, San Fr., 2016.
- [7] H.-J. Egelhaaf, M. Salvador, A. Distler, C.J. Brabec, Antioxidants Increase Resilience of Organic Photovoltaic Polymers and Blends towards Photooxidation, in: ICSM, Guangzhou/China, 2016.
- [8] L. Ke, J. Min, M. Adam, N. Gasparini, R. R. Tykwinski, C. J. Brabec, T. Ameri, "A series of pyrene-substituted SiPc and SiNc as near-IR sensitizers in organic ternary and quaternary solar cells: Synthesis and device fabrication," 9th International Symposium on Flexible Organic Electronics (ISFOE 16), Thessaloniki, Greece, July 2016 (oral presentation).
- [9] C. Hetzer, J. Zirzmeier, D. Lehnerr, P. Coto, E. Chernick, R. Casillas, B. Basel, I. Papadopoulos, S. Rajagopala, F. Hampel, M. Thoss, D. M. Guldi, R. R. Tykwinski "Conjugation as a Factor for Singlet Fission in Pentacene Dimers," Singlet Fission workshop, Lyons, Colorado, June 2016 (poster presentation).
- [10] M. Gruber, K. Padberg, A. R. Waterloo, F. Hampel, A. Görling, R. R. Tykwinski, "Synthesis and investigation of pentacene- and anthradithiophene-based n-type electron acceptors for organic electronics," 5th International SolTech Conference, Haus der Bayerischen Wirtschaft, München Germany, April 2016.
- [11] M. Gruber, J. Zirzmeier, R. Casillas, P. B. Coto, I. Papadopoulos, B. Basel, C. Hetzer, M. Thoss, D. M. Guldi, R. R. Tykwinski, "Synthesis of Pentacene Dimers and Acenequinol[3]cumulenes for the Study of Intramolecular Singlet Fission," The 1st International Symposium on Singlet Fission and Photon Fusion: Emerging Solar Energy Technologies, Chalmers Conference Center, Gothenburg Sweden, April 2016 (poster presentation).
- [12] Stefan A. Möckel, Astrid Hölzing, Peter J. Wellmann, Rainer Hock, In-situ phase formation study of CIS absorber layers from CuIn-nanoparticle and elemental Selenium hybrid precursors, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Strasbourg, 2012
- [13] Matthias Schuster, Stefan A. Möckel, Rachmat Adhi Wibowo, Rainer Hock, Peter J. Wellmann, Optimising the parameters for the synthesis of CuIn-nanoparticles by chemical reduction method for chalcopyrite thin-film precursors, MRS Spring Meeting 2013, USA.
- [14] Stefan A. Möckel, Matthias Arzig, Tobias Wernicke, Marco Brandl, Rainer Hock, Peter J. Wellmann, Influence of Gallium on the Formation Kinetics of Nanoparticulate Precursors for Low Temperature Processing of Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ Thin Films, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Lille, 2014
- [15] Stefan A. Möckel, Tobias Wernicke, Matthias Arzig, Philipp Köder, Marco Brandl, Rameez Ahmad, Monica Distaso, Wolfgang Peukert, Rainer Hock, Peter J. Wellmann, Low Temperature Formation of CuInSe₂ Solarcell Absorbers by an All Printed Two Species Nanoparticulate Se + Cu In Precursor, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Lille, 2014
- [16] André Zweschke, Peter J. Wellmann, Numerical Reactive Diffusion Modeling of SEL-RTP Chalcopyrite Absorber Layer Formation, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Lille, 2014
- [17] Hyesun Yoo, Arnaud Verger, Robert Lechner, Virginie Moreau, Stefan Jost, Jörg Palm, Rainer Hock "Different reaction pathway for the formation of Cu₂ZnSnSe₄ thin film from different stacking order of elemental layers" European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2014)
- [18] H. Yoo, R.A. Wibowo, G. Manoharan, R. Lechner, S. Jost, A. Verger, J. Palm, R. Hock "The formation mechanism of secondary phases in Cu₂ZnSnSe₄ absorber layer" E-MRS 2014 Spring Meeting

- [19] Marco Brandl, Rameez Ahmad, Monica Distaso, Wolfgang Peukert, Christoph J. Brabec, Rainer Hock "In-Situ XRD Analysis of the Recrystallization Process in CZTS Nano Particles Synthesized by Hot-Injection" E-MRS 2014 Spring Meeting
- [20] André Zweschke, Peter J. Wellmann, Progress on Numerical Reactive Diffusion Modeling of CuInSe₂ Phase Formation for Solar Cell Applications, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Lille, 2015
- [21] M. Schuster, M. Distaso, S.A. Möckel, W. Peukert, P.J. Wellmann, Synthesis of In₂Se₃ and Cu_{2-x}Se Micro- and Nanoparticles with Microwave-Assisted Solvothermal and Aqueous Redox Reactions for the Preparation and Stabilization of Printable Precursors to a CuInSe₂ Absorber Layer for Solar Cell Applications, Spring Meeting of the European Materials Research Society, Lille, 2015

MATSOL

- [22] B. Weisenseel, T. Fey, P. Zierath, P. Greil: Optical properties of carbon nanotube coatings on fibrous SiC for solar thermal applications, 6th EAM Symposium, Bad Staffelstein, 2014
- [23] B. Weisenseel, T. Fey, P. Zierath, P. Greil: Loop heat pipes mit mikroporöser SiC-Dochtstruktur, DKG-Jahrestagung, Clausfeld-Zellerfeld, 2014
- [24] A. Esmaeili, A. Javili, P. Steinmann: Thermomechanical coupling of geometrically non-coherent interfaces. GAMM, 2014
- [25] A. Vetter, K. Burlafinger, M. Woiton, C. J. Brabec: Highly accelerated lifetime testing via extreme illumination at controlled temperature for thin film solar cells. Talk. 31st EU PVSEC, Hamburg, 2015
- [26] L. M. Chepyga, G. Jovicic, A. Vetter, M. Batentschuk, C. J. Brabec: Photoluminescence Properties of YAG:Dy and YAG:Dy:Er Thermographic Phosphors Synthesized by Solid State, Co-precipitation and Solvothermal Methods. Talk, 17th YUCOMAT, Herceg Novi, Montenegro, 2015
- [27] A. Hashemi, A. Vetter, G. Jovicic, M. Batentschuk, C. J. Brabec: Dual-Channel Lock-in Thermometry with Thermographic Phosphors. Poster. Advanced Laser Technologies, Faro, Portugal, 2015
- [28] A. Vetter, B. Hofbeck, P. Kubis, C. J. Brabec: Assessing the accuracy of imaging techniques for defect characterization on thin film solar cells. Talk. 42nd IEEE PVSC, New Orleans, USA, 2015
- [29] I. Levchuk, L. M. Chepyga, A. Osvet, A. Stiegelschmitt, A. Hashemi, G. Jovicic, A. Vetter, M. Batentschuk, A. Winnacker, C. J. Brabec: Colloidal nanoparticles LaPO₄:Dy³⁺ as a printable material for the luminescent thermometry. Talk. E-MRS Fall Meeting, Warschau, Polen, 2015
- [30] I. Levchuk, C. Würth, F. Krause, A. Osvet, M. Batentschuk, U. Resch-Genger, C. J. Brabec: Smart nanophosphor material for effective Near-UV-light conversion: synthesis, upscaling and photovoltaic application. Invited Talk. 4th International Symposium on Ceramics Nanotune Technology, Nagoya, Japan, 2015
- [31] I. Levchuk, A. Osvet, F. Hoegel, C. s. O. Ramirez Quirzo, S. Shrestha, M. Brandl, R. Hock, P. Herre, W. Peukert, M. Batentschuk, C. J. Brabec: Organometallic perovskites for optoelectronic applications. Poster. 7th EAM Symposium, Kloster Banz, 2015
- [32] A. Haase: N-doped Diamond and Graphene for Thermoelectrical Applications, NCND 2015, Shizuoka (Japan), 25.05.2015
- [33] B. Weisenseel; T. Fey; P. Greil: Carbon nanotube and hafnium carbide absorber coatings for concentrating solar power. 11th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications, 2015, Vancouver
- [34] B. Weisenseel; T. Fey; P. Greil: Carbon nanotube and refractory carbide coatings on silicon carbide for solarthermal applications. 90. DKG Jahrestagung & Symposium Hochleistungskeramik, 2015, Bayreuth
- [35] L. Adler, F. Warmuth: Prozesstechnische Herstellung von zellularen metallischen Metamaterialien, DGM Fachausschuss – Zellulare Werkstoffe, Bremen, 06.10.2015
- [36] C. Körner: From open-cellular materials to mechanical metamaterials, International Conference MetFoam, Barcelona, 2015, invited talk
- [37] A. Esmaeili; A. Javili, P. Steinmann: Damage on coherent interfaces. UNCCM , San Diego, USA, 2015
- [38] A. Esmaeili; A. Javili; P. Steinmann: Damage on non-coherent interfaces. ISDM , Bremen, Germany, 2015
- [39] L. Adler, F. Warmuth: Prozesstechnische Herstellung von zellularen metallischen Metamaterialien, DGM Fachausschuss - Zellulare Werkstoffe, Bremen, 10/2015
- [40] L. Adler: Processing of iron aluminides via selective electron beam melting (SEBM), DGM-Fachausschuss – Intermetallische Phasen, Erlangen, 4/2016
- [41] L. Adler: The effect of a negative Poisson's ratio on thermal stresses in cellular metallic structures, lecture presentation, CellMAT – Cellular Materials, Dresden, 12/2016

TRANSPORT

- [42] Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Thermodynamic Analysis of Hydrogen Carrier Materials. AIChE Annual Meeting, 2015
- [43] Jonas Obermeier, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Analyse thermochemischer Wärmespeicher auf stofflicher und konzeptioneller Ebene. Thermodynamik Kolloquium, 2015
- [44] Jonas Obermeier, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Thermodynamic analysis of chemical heat pumps. 28th European Symposium on Applied Thermodynamics, 2015
- [45] Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Energy storage using Liquid Organic Hydrogen Carrier. Energy, Science and Technology International Conference & Exhibition, 2015
- [46] Jonas Obermeier, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Konzept eines überregionalen Energietransports mit Hilfe thermochemischer Wärmespeicher. 20. Energiesymposium, 2014
- [47] Karsten Müller, Irma Schmidt, Wolfgang Arlt, Energiespeicherung in Ameisensäure: Konzepte und Bilanzen. Process-Net-Jahrestagung, 2014
- [48] Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Reaction thermodynamics and phase separation in LOHC processes. Journées d'Etude des Equilibres entre Phases, 2014
- [49] Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Evaluierung von Wasserstoffkonversionssystemen. Jahrestagung Energieverfahrentechnik, 2014
- [50] Benjamin Müller, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Comparison of Potential Alternative Process Options for Solar Energy Storage and Distribution. AIChE Annual Meeting, 2013
- [51] Karsten Müller, Johannes Völkl, Wolfgang Arlt, Reaktionsgleichgewichte von Ionischen Flüssigkeiten als LOHC. Thermodynamik-Kolloquium, 2013
- [52] Karsten Müller, Katharina Stark, Wolfgang Arlt, Recent developments in the field of LOHC based energy storage. 9th European Congress of Chemical Engineering, 2013
- [53] Karsten Müller, Daniel Teichmann, Peter Wasserscheid, Wolfgang Arlt, Energiespeicherung mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger. 44. Kraftwerkstechnischen Kolloquium, 2012
- [54] Frank Piepenbreier, Martin Hartmann. High Temperature Thermochemical Energy Storage with Metal Oxides Embedded in a Porous Matrix. iSEneC, 2016
- [55] Patrick Preuster, Lisa Wagner, Andreas Nuß, Johannes Geiling, Michael Steinberger, Andreas Bösmann, Peter Wasserscheid, Evaluation of a reactor concept for the process intensification and heat management in the hydrogenation and dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs), World Hydrogen Energy Conference 2016, 2016

NET

- [56] Waltrich U., Bayer C. F., Schletz A.: Feldsteuerung mit Isoliersubstraten, Cluster Leistungselektronik, Kolloquium, Erlangen, 2015
- [57] Waltrich, U.; Ruccius, B.; Malipaard, D.; Schletz, A.: High voltage power modules with increased surge current capability, ECPE Workshop – Advances in Thermal Materials and Systems for Electronics, 2015
- [58] J. Vogelsang. Neue Methoden der Resistanzmessung. Siemens R&D Kolloquium. Wien 02.2015
- [59] J. Vogelsang. Setting-less Relay. Siemens R&D Kolloquium. Berlin 07.2015
- [60] J. Vogelsang. Fehlererkennung mit Fuzzy-Logik. Siemens R&D Kolloquium. Nürnberg 09.2015
- [61] M. Dauer, J. Jäger. Computer-based optimization of protection system design and coordination. Invited panel session presentation auf IEEE PES General Meeting 14PESGM2706, Washington D.C., 07.2014
- [62] M. Dauer. Protection Security Assessment – Automated Approach and Practical Examples for Protection System Improvement. IEEE PES General Meeting, Panel Session "System Security"., Denver, USA, 07.2015
- [63] M. Dauer. Automated Protection System Assessment and Audits for Transmission and distribution Systems. European Utility Week. Wien, 11.2015
- [64] J. Schindler, J. Jäger. Charakteristiken des sekundären Lichtbogenstromes bei AC-DC-Hybridleitungen. 9. ETG/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik. Berlin, 02.2016
- [65] C. Blug, L. Shang-Jäger, T. Bopp, R. Krebs, M. Dauer; J. Jäger. Erfahrungen mit einer systematischen Schutzbewertung in Verteilnetzen. 9. ETG/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik. Berlin, 02.2016
- [66] M. Dauer, J. Jäger, T. Bopp, R. Krebs. Automatisierte Schutzbewertung. 9. ETG/FNN-Tutorial Schutz- und Leittechnik. Berlin, 02.2016

- [67] M. Schroeder, J. Jaeger. Hybride Netze – Batteriespeicheranwendungen: Integration von Batteriespeichern in den Modularen Multilevel-Umrichter (MMC), EnCN-NET Meeting 22.03.2013
- [68] S. Henninger. Hybride Netzarchitekturen, EnCN-NET Meeting 11.10.2013
- [69] M. Schroeder, J. Jaeger. Modularer Multilevel-Umrichter für Batteriespeicheranwendungen. Strategie-Workshop „Forschung und Lehre“ des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme, 17.10.2013
- [70] S. Henninger. Hybrides Verteilnetz. Strategie-Workshop „Forschung und Lehre“ des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme, 17.10.2013
- [71] M. Schroeder, J. Jaeger. Modularer Multilevel-Umrichter für Batteriespeicheranwendungen. Siemens Projekt-Besprechung, 29.11.2013
- [72] S. Henninger. DC-Clustering und zentrierte Einspeisung – Grundlastfähigkeit von EE. Siemens Projekt-Besprechung, 29.11.2013
- [73] S. Henninger. Eine neue Methode zur nachhaltigen Integration von regenerativen Erzeugungsanlagen. Projektvorstellung Siemens Industry, 16.01.2014
- [74] S. Henninger. Smart Power Plant (SPP) – Eine neue Methode zur nachhaltigen und netzkompatiblen Integration von regenerativen Erzeugungsanlagen. Konzeptpräsentation Siemens, 30.04.2014
- [75] M. Schroeder, S. Schmitt, J. Jaeger. SIESTORAGE 2.0 – Batteriespeicher der nächsten Generation. Siemens Projekt-Besprechung, 16.10.2014
- [76] S. Henninger. Smart Power Plant (SPP) – Eine neue Methode zur nachhaltigen und netzkompatiblen Integration von Erneuerbaren Energien, Präsentation Bayernwerk, 03.12.2014
- [77] S. Henninger, M. Schroeder. Energiespeicher für die Energiewende. VDE-Arbeitskreis „Energiesysteme der Zukunft“, 24.03.2015
- [78] S. Henninger. Smart Power Plant (SPP) – Eine neue Methode zur nachhaltigen und netzkompatiblen Integration von Erneuerbaren Energien. Siemens Projekt-Besprechung, 17.04.2015
- [79] M. Schroeder. Modularer Multilevel-Umrichter für Batteriespeichersysteme. Siemens Projekt-Besprechung, 17.04.2015
- [80] M. Schroeder, S. Henninger, Comparison of Primary Control Strategies for an Energy Storage Hardware-Setup. Integration of Sustainable Energy Conference, 2016
- [81] Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß; Power Quality Control Issues in Distribution Grids, Experience from field test NetzQ; ECPE Workshop „Power Electronics in the Electrical Network“, Kassel; 12.-13. März 2013
- [82] Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß; Leistungselektronik in elektrischen Verteilnetzen zur Steigerung der Netzqualität; Cluster Forum „Windenergie – neue Konzepte, innovative Technologien“, Nürnberg; 26. November 2013
- [83] Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß; Herausforderungen und Lösungen für die Netzintegration von dezentraler Einspeisung; RENEXPO Salzburg; 29.November 2013
- [84] Sebastian Hörlin, Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß, Grid Stabilisation and Power Quality Improvement by Means of Distributed Power Electronic Converters; iSEneC 2016, Nürnberg, 11.07.2016
- [85] Fritz Ferner, Felix Nickl, Norbert Grass; Modular and Intelligent Battery Control System for Electric Vehicles and Stationary Storage Systems; Intelec 2016, Austin, TX, 24.10.2016 – 27.10.2016
- [86] Sebastian Rehmet, Norbert Grass; Full Scale Power Quality Emulation System for Testing of Low Voltage Grid Components; IEEE International Energy Conference, Dubrovnik, 13.05.2014 – 16.05.2016
- [87] Joffe, C., Ditze, S., Roßkopf, A.: A novel positioning tolerant inductive power transfer system, Energy Transfer for Electric Vehicles Conference (ETEV), Nuremberg 2013
- [88] Roßkopf, D.: Simulativer Ansatz zur Bestimmung von Litzen Verlusten, Sommerschule Elektromagnetische Berechnung, Wuppertal, 15.-19. September 2014
- [89] Ditze, S.: Steady-state analysis of the bidirectional CLLLC resonant converter in time domain, IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Vancouver, 2014
- [90] Joffe, C.: Leistungsfähigkeit und begrenzende Faktoren induktiver Energieübertragungssysteme, Gemeinsame Vortragsreihe des Bayerischen Clusters Leistungselektronik und des „Fraunhofer-Innovationsclusters Elektronik für nachhaltige Energienutzung“, Fraunhofer IISB Erlangen, 14. Juli 2014
- [91] Roßkopf A.: Simulative Bestimmung von ohmschen Verlusten in elektrischen Systemen mit HF-Litzen, Gemeinsame Vortragsreihe des Bayerischen Clusters Leistungselektronik und des „Fraunhofer-Innovationsclusters Elektronik für nachhaltige Energienutzung“, Fraunhofer IISB Erlangen, 14. Juli 2014
- [92] B. Eckardt. E-Sports Car IISB-1 - A test platform for next generation power electronics. World Mobility Summit, 2015
- [93] A. Roßkopf, Wicklungsverluste in leistungselektronischen Systemen mit Hochfrequenzlitzen, ANSYS Conference & CADFEM Users' Meeting 2015
- [94] Roßkopf, A.: Induktive Komponenten unter Berücksichtigung von Kern-, Litzen- und Schaltungsverlusten, ACUM 2016
- [95] Joffe, C.: Modular Charging Solutions, ECPE Workshop – Power Electronics for e-Mobility, Stuttgart 2016

- [96] M. Trautmann, "Implementation of Simultaneous Energy and Data Transfer for Charging Electric Vehicles" in International Energy Transfer for Electric Vehicles Conference (ETEV), Sep. 2015
- [97] M. Wenger, V.R.H. Lorentz, Dezentrales Batteriemonitoring mit kapazitiv gekoppelter Datenübertragung, EMA-Nürnberg 2012, Nürnberg, 2012
- [98] V.R.H. Lorentz, Dezentrale Batteriezellen-Elektronik, VDMA Productronic: Electrical Energy Storage (EES2012), München, 14.11.2012
- [99] R. Filimon, V.R.H. Lorentz, M. Wenger, J. Grosch, M. Giegerich, M. März, L. Frey, Dezentrales Batterie Monitoring mit kapazitiv gekoppeltem Datenbus. 20. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte, München, 2013.
- [100] S. Koffel, M. Giegerich, R. Filimon, J.L. Grosch, T. Fühner, M.M. Wenger, M. Gepp, V.R.H. Lorentz, Model Order Reduction for Electrothermal Modelling of Battery Cells and Systems, ANSYS Conference & 32. CADFEM Users' Meeting, Nürnberg, 2014
- [101] S. Waldhör; M. Giegerich; S. Koffel; V.R.H. Lorentz; M. März. Electrochemical Modelling and Simulation of a high capacity LiFePO4 Battery. 4th International Symposium on Energy Challenges and Mechanics, 2015
- [102] M. Giegerich, M. Akdere, C. Freund, T. Fühner, J. Grosch, S. Koffel, R. Schwarz, S. Waldhör, M. Wenger, V.R.H. Lorentz, Advanced Modular Electrical Energy Storage System for Stationary Application, ISENEC 2016, Nürnberg, 2016
- [103] R. Schmidt, I. Mladenovic. Smart Grid Solar – Ein intelligentes Netz im Demonstrationsversuch. Bayern Innovativ Cluster-Forum Intelligente Verteilnetze, 2013
- [104] R. Schmidt. State Estimation in Verteilnetzen. Modellprojekt Smart Grid Solar. Wegweiser für nachhaltig dezentrale Energiekonzepte, 2015
- [105] R. Schmidt; M. Luther; I. Mladenovic; C. Weindl. Analysis of low voltage networks with high Distributed Power Generation. 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED 2015), 2015
- [106] A. Schmutzer; J. Bogenrieder; G. Jung; P. Luchscheider; S. Müller; R. Schmidt; C. Stegner; S. Trampler. Integrated Approach for Smart Grid Data Acquisition, Transmission and Evaluation. 5th International Workshop on Integration of Solar into Power Systems, 2015
- [107] K. Veerashekar; C. Strohm; M. Luther. Investigation of Operation of Decentralized Battery Storage Systems As A Virtual Storage Power Plant, Integration of Sustainable Energy Conference, Nürnberg, 2016
- [108] K. Veerashekar; J. Riedl; M. Luther; I. Sigert. Influence of Decentralized Battery Storage Systems Providing Primary Control Reserve on Distribution Grids, Integration of Sustainable Energy Conference, Nürnberg, 2016
- [109] K. Veerashekar; M. Luther. Betriebsverhalten dezentraler Batteriespeichersysteme in elektrischen Energiesystemen. Bayern Innovativ Cluster-Treff: Systemintegration dezentraler Batteriespeicher - Ergebnisse aus dem Modellprojekt SWARM, Nürnberg, 2016
- [110] K. Veerashekar; X. Zhang; M. Luther. Investigation of Various Constellations of Battery Storage Systems in Low Voltage Grids. International Renewable Energy Storage Conference, Düsseldorf, 2016
- [111] M. Luther. Netzdienstleistungen durch Speicherintegration. Fachforum "Energiespeicher im Kontext der Energiewende". IHK Akademie Mittelfranken, Nürnberg, 2015
- [112] M. Kuba, A. Oeder, K. Ronge, R. Weigel. Automatische Klassifikation von Kommunikationsstandards im Sub-GHz-Bereich. 2013 Radar, Communication and Measurement Conference. 2013
- [113] M. Kuba, J. Saalmüller, A. Oeder. 868 MHz Traffic Detective: A Software-Based Tool for Radio Traffic Monitoring. Wireless Congress 2014: Systems & Applications Electronic. Nuremberg, 2014
- [114] J. Saalmüller; M. Kuba; A. Oeder. A User-Friendly Android-Based Tool for 868 MHz RF Traffic- and Spectrum-Analysis. Konferenzbeitrag embedded world. 2015

PROCESS

- [115] Dietz, A.: Betrachtung der Systemkomplexität bei elektrischen Antriebssträngen, Workshop Leichtbau in der Antriebstechnik, Cluster Mechatronik und Automation, Augsburg, 2014
- [116] Hörlin, S.; Dietz, A.: Energetische Simulation von mechatronischen Antriebssträngen, WIKE³ Aschaffenburg, 2014
- [117] Hubert, T.: Synchron-Reluktanzmaschine als dynamischer elektrischer Antrieb ohne Seltene-Erden – Erste Abschätzung und Bewertung der Leistungsfähigkeit, WIKE³ Aschaffenburg, 2014
- [118] Hubert, T.: Auslegung von Synchron-Reluktanzmaschinen mit ANSYS Maxwell, ANSYS Anwendertag, Nürnberg, 2014
- [119] Reinlein, M.: Eisenverluste in Theorie und Praxis, ANSYS Anwendertag, Nürnberg, 2014
- [120] Kremser, A.: Energy-efficient electric drives and powertrains in variable speed drive applications, Green Factory Kolloquium, Nürnberg, 2014

- [121] S. Wendel; et al. Predictive Control for fractional horse power drives (FHP), 10. ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems, 2015
- [122] M. Blank; et al. Evaluation of model based predictive control algorithms for fractional horse power drives, Green Factory Kolloquium, 2015
- [123] S. Hörlin, Energetic simulation of complex mechatronic drive systems over complete drive cycles, Green Factory Kolloquium, 2015
- [124] S. Hörlin; A. Dietz; N. Graß . Multi Use Battery Storage System. iSEneC, 2016
- [125] N. Graß; S. Hörlin. Grid Stabilization and Power Quality Improvement by Means of Distributed Power Electronic Converters. iSEneC. 2016
- [126] A. Dietz; N. Graß; S. Hörlin. High Voltage Battery Storage System for Multi Use. EVER – Ecological Vehicles and Renewable Energies. 2016. Monaco
- [127] M. Reinlein; M. Regnet; T. Hubert; J. Bönig; A. Kremser; U. Werner. Influence of Villari Effect on the Magnetizing Current of Induction Machines by shrink fitting of rotor cores. SPEEDAM. Juni 2016. Capri, Italien
- [128] M. Reinlein; M. Swarte; T. Hubert; A. Kremser. Influence of yoke and tooth saturation on the air gap field in Induction Machines: A new analytical approach. International Conference on Electrical Machines ICEM. Sept. 2016. Lausanne, Schweiz
- [129] M. Regnet; M. Reinlein; A. Kremser. Investigation of shaft steel magnetization and stator core magnetization and their influences on the magnetic behavior of two pole induction machines. Applied Research Conference. Jun. 2016. Augsburg
- [130] T. Gerlach; R. Steckel; T. Hubert; A. Kremser: Eddy current loss analysis in permanent magnets of synchronous machines; 6th Electric Drives Production Conference (EDPC). 2016. Nürnberg
- [131] P. Löhdefink: Drehzahlvariable Kaskadenmaschine als Generatorsystem für Kleinwasserkraftwerke, 19. Internationales Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke. Sept. 2016. Innsbruck
- [132] S. Wendel; M. Blank; P. Löhdefink; M. Hoerner; A. Dietz. Model predictive speed control for permanent magnet synchronous machines (PMSM). iSEneC. 2016. Nürnberg
- [133] S. Wendel; P. Löhdefink; M. Hoerner; A. Dietz. Flexible und intelligente Kleinantriebstechnik für Industrie 4.0. Green Factory Kolloquium. 2016. Nürnberg

BUILDING I

- [134] G. Giannakis, K. Katsigarakis, G. Kontes, D. Rovas: Co-simulation setup for online model-assisted control design. CLIMA 2013 / 11th REHVA World Congress, Prag, Tschechische Republik, 16. - 19. Juni, 2013.
- [135] E. Kontogianni, G. Giannakis, G. Kontes, D. Rovas: Comparing the impact of different thermal comfort constraints on a model-assisted control design process. CLIMA 2013 / 11th REHVA World Congress, Prag, Tschechische Republik, 16. - 19. Juni, 2013.
- [136] G. Lilis, G. Giannakis, D. Rovas: SRC and its applications to building thermal control. CLIMA 2013 / 11th REHVA World Congress, Prag, Tschechische Republik, 16. - 19. Juni, 2013.
- [137] S. Steiger, J.K. Roth, L. Ostergaard: The advantages of a hybrid ventilation concept for schools. CLIMA 2013 / 11th REHVA World Congress, Prag, Tschechische Republik, 16. - 19. Juni, 2013.
- [138] G. Lilis, F. Sklivaniotis, G. Giannakis and D. Rovas: SRC: a systemic approach to building thermal simulation. Building Simulation Conference 2013, Chambéry, Frankreich, 25. - 28. August, 2013.
- [139] J. Rojicek, R. Fisera, G. Kontes, G. Giannakis, G. Lilis, D. Rovas: Functional and technological definition of BIM-aware services to assess, predict and optimize energy performance of buildings. 2nd Central European Symposium on Building Physics, Wien, Österreich, 9. – 11. September, 2013.
- [140] G. Grün: Luftwechsel und Feuchtmanagement in Wohnungen – Chancen und Risiken bei der Sanierung. B+B Forum Bautenschutz: Feuchte - Schadstoffe – Raumluftqualität, Köln, 1.10.2013.
- [141] C. Valmaseda, M. Garcia Fuentes, J. Hernandez, K. Katsigarakis, G. Kontes and D. Rovas: An Event-driven SOA-based Platform for Energy-efficiency Applications in Buildings. 30th International Conference on Applications of IT in AEC Industry (CIB W78 2013), Beijing, China, 9. – 12. Oktober, 2013.
- [142] S. Steiger: Auswirkungen verschiedener Sanierungsmaßnahmen auf das Innenraumklima in Schulen. 3. Kongress Zukunftsraum Schule, Stuttgart, 12. - 13. November, 2013.
- [143] D. Rovas: Current Projects in European Research and their relevance for the regulation of Commercial Buildings. Sauter Group Meeting. München, Deutschland, 9. Mai, 2014.
- [144] K. Macek, D. Rovas, M. Schmidt, C. Valmaseda: Holistic Optimization of HVAC Systems via distributed data-driven control. 8th International Conference on Intelligent Systems and Agents, Lisbon, Portugal, 15. - 17. Juli, 2014.

- [145] G. Lilis, G. Giannakis, G. Kontes, D. Rovas: Semi-automatic thermal simulation model generation from IFC data. 10th European Conference on Product and Process Modelling, Wien, Österreich, 17. – 19. September, 2014.
- [146] K. Katsigarakis, G. Kontes, J. Rojicek, C. Valmaseda, J. Hernandez, D Rovas: An ICT Platform for Building Analytics, 10th European Conference on Product and Process Modelling, Wien, Österreich, 17. – 19. September, 2014.
- [147] D. Rovas: Urban-Scale Building Network (funded by the EPSRC) Workshop, London, United Kingdom, 24. November, 2014.
- [148] G. Grün: Towards an Identification of European Indoor Environments' Impact on Health. Healthy Buildings Day 2015, Brüssel, Belgien, 24.3.2015.
- [149] P. Noisten, A. Tan, K. Kirmayr, G. Grün: Definition of a building design process as guidance for an appropriate choice of technologies and including innovation and risk management. Lake Constance 5D-Conference 2015, Konstanz, 5.5.2015.
- [150] S. Urlaub, G. Grün, P. Foldbjerg, K. Sedlbauer: The influence of the indoor environment on sleep quality. Healthy Buildings Europe 2015, Eindhoven, Niederlande, 18. – 20. Mai 2015.
- [151] G. Grün: Energetische Modernisierung und Denkmalschutz: Stand der Technik und aktuelle Trends. 4. Symposium der Klima- und Energieagentur Bamberg, Bamberg, 20.5.2015
- [152] G. Grün: Einfluss des Raumklimas auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit in Europa: 2. AktivPlus Symposium – UMWELT. QUARTIER. GEBÄUDE, Stuttgart, 21.5.2015.
- [153] A. Tan: Definition of the needs for enhanced building operation using BIM. 22. Industrieauseminar, Wien, Österreich, 1. – 3. Juli, 2015.
- [154] G. Grün, S. Park: Energy In-Efficient Occupants in Buildings: Threat or Opportunity? International Symposium on Building Energy Performance and Occupant Behaviour, Karlsruhe, 3.8.2015.
- [155] G. Schneider, J. Oppermann, A. Constantin, R. Streblov, D. Müller: Hardware-in-the-Loop-Simulation of a Building Energy and Control System to Investigate Circulating Pump Control Using Modelica. 11th International Modelica Conference, Versailles, Frankreich, 21. – 23. September, 2015.
- [156] S. Urlaub, G. Grün, P. Foldbjerg, K. Sedlbauer: Ventilation and health – a review. 36th AIVC conference, Madrid, Spanien, 23. - 24. September 2015.
- [157] G. Giannakis, G. Lilis, M. Garcia, G. Kontes, C. Valmaseda, D. Rovas: A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models. Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien, 7. – 8. Dezember, 2015.
- [158] G. Grün: Nachhaltigkeit durch Digitalisierung. Bau Forum Berlin: Industrialisierung und Digitalisierung des Bauwesens, Berlin, 2.12.2015.
- [159] G. Lilis; G. Giannakis; D. Rovas: Detection and semi-automatic correction of geometric inaccuracies in IFC files. Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien, 7. – 8. Dezember, 2015.
- [160] G. Schneider. Development of a semantic data model for building automation systems. Vorlesungsreihe "Bauphysik in der Forschung", Technische Universität München, WS 2015/2016.
- [161] G. Grün: Raumklima und Luftqualität - lokal und individuell. Symposium Menschen in Räumen, Stuttgart, 16.3.2016.
- [162] G. Kontes: Building Energy Management Systems – Model-based control design. Building Analysis Methods and Modeling Seminar, University College London, London, United Kingdom, 30. Juni, 2016.
- [163] S. Urlaub, G. Grün, P. Foldbjerg, K. Sedlbauer: The impact of ventilation and daylight on learning in schools - a summary of the actual state of knowledge. Indoor Air 2016, Ghent, Belgien, 3. – 8.Juli 2016.
- [164] S. Urlaub, A. Steidle, G. Grün, K. Sedlbauer: The influence of moderate heat stress on thermal comfort, motivation and mood at work places - a meta-analytic synthesis. Indoor Air 2016, Ghent, Belgien, 3. – 8.Juli 2016.
- [165] S. Urlaub, A. Steidle, G. Grün, C. van Treeck, M. Denzler, K. Sedlbauer: The influence of moderate heat stress on performance - a meta-analytic synthesis. Indoor Air 2016, Ghent, Belgien, 3. – 8.Juli 2016.
- [166] G. Kontes: Modelling and prediction of buildings energy consumption using Machine Learning techniques. 1st Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC), Nürnberg, Deutschland, 11.- 12. Juli, 2016.
- [167] G. Schneider, A. Michaelis, S. Steiger, G. Grün: Development of a Hardware-in-the-Loop Testbench to Evaluate the Energy Efficiency of Smart Home Systems for Room Temperature Control. 1st Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC), Nürnberg, Deutschland, 11.- 12. Juli, 2016.
- [168] G. Schneider: Towards Formal Modelling of Control Logic in Building Automation Systems. 12th Semantic Web Summer School (SSSW), Bertinoro, Italien, 17. – 23. Juli, 2016.
- [169] G. Schneider, A. Bougain, P. Noisten, M. Mitterhofer: Information Requirement Definition for BIM: A Life Cycle Perspective. 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM), Limassol, Zypern, 7. - 9. September, 2016.
- [170] G. Giannakis, G. Kontes, I. Korolija, D. Rovas: Simulation-time Reduction Techniques for a Retrofit Planning Tool. Building Simulation Conference 2016 / 3rd IBPSA - England Conference, Newcastle, United Kingdom, 12. – 14. September, 2016.

- [171] G. Schneider, Y. Kalantari, G. Kontes, S. Steiger, D. Rovas: An Ontology-Based Tool for Automated Configuration and Deployment of Technical Building Management Services. BauSIM 2016 / Central European Symposium on Building Physics (CESBP) 2016, Dresden, Germany, 14 – 16. September, 2016.
- [172] G. Grün: Gutes Wohnen – Lüften. GutesWohnen-Auftakt-Forum, Berlin, 4.10.2016.
- [173] G. Grün: Indoor Environments' Impact on Health - Mould and Dampness. Unhealthy homes in Europe: Overview, health impacts and costs, Brüssel, Belgien, 16.11.2016.
- [174] G. Grün: Raumklima: Neue Erkenntnisse und Lösungsansätze zum Lernen im leistungsfördernden Raum. SCHULBAU München 2016, München, 16.11.2016.
- [175] G. Grün: Sanierungskonzepte mit hohem Wirkungsgrad – Praxisbeispiele. 3. Fachkonferenz Flächenheizung/-kühlung als Verbindungselement zwischen Architektur und Anlagentechnik, Benediktbeuern, 29.11.2016.
- [176] S. Steiger, M. Visser, D. Rösler: Adaptive Heizungsregelung - Erweiterungen zur Schadensprävention und thermischen Behaglichkeit, 1. E|Home-Center Symposium, Nürnberg, Deutschland. 30.November – 1. Dezember, 2016.

BUILDING II

- [177] Michael Beck, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Heat integration and storage concepts for increasing the energy efficiency of domestic cooling applications. Integration of Sustainable Energy Conference, 2016
- [178] Karsten Müller, Andrea Baumgärtner, Wolfgang Arlt, Systematic identification of working pairs for absorption heat converters. European Congress on Chemical Engineering, 2015
- [179] Andrea Baumgärtner, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Working pair selection for absorption heat converters using predictive models. 28th European Symposium on Applied Thermodynamics, 2015
- [180] Andrea Baumgärtner, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Thermodynamical considerations for the working pair selection in absorption chillers. 27th European Symposium on Applied Thermodynamics, 2014
- [181] Andrea Baumgärtner, Michael Beck, Karsten Müller, Wolfgang Arlt, Approach for the Selection of An Innovative Working Pair for Absorption Chillers and Heat Pumps. AIChE Annual Meeting, 2013
- [182] Andrea Baumgärtner, Michael Beck, Karsten Müller, Wolfgang Arlt. Einsatz von COSMO-RS zur Auswahl von Arbeitsstoffpaaren für Absorptionswärmepumpen“, Thermodynamik-Kolloquium, 2013
- [183] M. Hinze, F. Ranft, D. Drummer, W. Schwieger. Enhanced adsorber systems based on thermally conductive polymers for heat transformation applications. Integration of Sustainable Energy Conference, Nürnberg 2016
- [184] M. Hinze, W. Schwieger. AEI Based Materials for Heat Transformation: Synthesis and Cycle Stability of a SAPO-18 Adsorbent. 18th International Zeolite Conference, Rio de Janeiro 2016
- [185] M. Hinze, F. Ranft, D. Drummer, W. Schwieger. Zeolite/Polymer Composites: Adsorber materials and systems for heat transformation applications. 28. Deutsche Zeolith-Tagung, Gießen 2016
- [186] M. Hinze, E. Pleissner, A. Kuhnt, W. Schwieger. CHA and AEI based materials for heat transformation: structural stability during water ad- and desorption cycles. 27. Deutsche Zeolith-Tagung, Oldenburg 2015
- [187] E. Pleissner, R. Hock, A. Kuhnt, M. Hinze, V.R.R. Marthala, M. Hartmann, W. Schwieger. Thermal stability of SAPO-34 at elevated temperatures studied by in-situ XRD. 6th International FEZA Conference, Leipzig 2014
- [188] M. Hinze, F. Ranft, D. Drummer, W. Schwieger. Development of heat conducting zeolite/polymer composite materials for heat transformation applications. 26. Deutsche Zeolith-Tagung, Paderborn 2014
- [189] Dentel, A., „TRNSYS Type 399: PCM-Wall“, TRNSYS Usertag, Stuttgart, 08.03.2013.
- [190] Dippel, T.; Dentel, A., Bockelmann F.; Wagner C., „Optimierung von Planung, Betriebskontrolle und Steuerung von erdgekoppelten Wärmepumpen in Kombination mit TABS in Bürogebäuden“, 12. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, Neumarkt i. d. OPf, 19.03.-20.03.2013.
- [191] Dentel, A., „Energie - und lastflexible Gebäude und Produktionsstätten“, Hochschulkongress Mittelfranken 2013, Nürnberg, 09.10.2013.
- [192] Betzold, C., Buderus, J., Dentel, A.. Powermanagement Systems for Sustainable Energy in Buildings and Communities. Integration of Sustainable Energy Conference, Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg, Germany
- [193] Betzold, C., Dentel, A.. Entwicklung einer Betriebsführungsstrategie für modulierende Wärmepumpen mit Energiespeichern und Photovoltaik. 2. Fachforum Green Buildings, Okt. 26th -27th, 2016, Frankfurt/Main, Germany
- [194] Buderus, J., Dentel, A., Stephan, W.. Flexible building technologies for demand-side-management. Integration of Sustainable Energy Conference, Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg, Germany
- [195] Buderus, J., Dentel, A., Stephan, W.. Model predictive control for air conditioning systems in production sites. CLIMA 2016, May 22th – 25th, 2016, Aalborg, Denmark
- [196] Bordin, S., Kandasamy, K., Franz, M., Dentel, A.. Development of an energy efficient window and design of control strategies. Integration of Sustainable Energy Conference, Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg, Germany

- [197] W. Krcmar. Energieeffizienz bei Gebäuden: Die Rolle von Baustoffinnovationen und Automatisierung. Vortrag anlässlich des Kongress „Energie Innovativ – Forschung und Innovationen für den Energieumstieg“, Meistersingerhalle Nürnberg, 18.04.2013
- [198] W. Krcmar. Entwicklung neuer höchstwärmedämmender Massiv-Wandbaustoffe, Vortrag anlässlich der Tagung BAU Innovativ 2013, Fürstenfeldbruck, 14.11.2013
- [199] B. Hintz; W. Krcmar. Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste. Vortrag anlässlich der Mitgliederversammlung Innovationszirkel Hintermauerziegelindustrie der Ceramix AG, TH Nürnberg, 24.09.2014
- [200] S. Schmidt; W. Krcmar. Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Minderung des Emissionskoeffizienten. Vortrag IFF-Baustoff-Forum „Ziegel-Entwicklungen, Trends, Perspektiven“, Weimar, 27.02.2014
- [201] W. Daudrich; N. Hesse; W. Krcmar, et al.. Hochfeste Geopolymere auf Basis von Flugasche und Hüttensand hergestellt bei Raumtemperatur. Präsentationsstand „Höchstwärmedämmende Wandbaustoffe“, Messe Ceramitec 2015, München
- [202] P. Müller; N. Hesse; W. Krcmar. Herstellung eines druckfesten mineralischen Schaums auf Geopolymerbasis. Poster, Messe Ceramitec 2015, München
- [203] M. Noak; N. Hesse; W. Krcmar. Einfluss der Kaolin-Lagerstätte und der Sintertemperatur auf die Druckfestigkeit von Metakaolin-Geopolymeren. Poster, Messe Ceramitec 2015, München
- [204] S. Schmidt; W. Krcmar. Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel, Poster, Messe Ceramitec, 2015, München
- [205] A. Geber; N. Wedel; Krcmar, W. Neuartige Trocknungsverfahren von keramischen Formlingen, ZIM Forschungsprojekt KF 2151802SU4, Ceramix AG, Vorträge am 07.05.2015, 15.10.2015, 20.01.2016, 13.04.2016, 26.07.2016, Nürnberg
- [206] E. Kränzlein; W. Krcmar. Erforschung ressourcen- und energieeffizienter Ziegel; PTJ-Forschungsprojekt NW-1303-0007, POROTON-Werk Schlagmann, Vorträge am 11.05.2015, 20.10.2015, 19.07.2016, Zeilarn
- [207] C. Allar; W. Krcmar et al. Präsentationsstand „Höchstwärmedämmende Wandbaustoffe“, Lange Nacht der Wissenschaften, 24.10.2015, Energie Campus Nürnberg
- [208] W. Krcmar. Neue höchstwärmedämmende Wandbaustoffe. Vortrag anlässlich einer Informationsveranstaltung für CSU-Staatssekretär F.-J. Pschierer, 09.02.2015, Energie Campus Nürnberg
- [209] W. Krcmar. Präsentation innovativer Baustoffe für die Energiewende. Life-Fernsehübertragung im Bayerischen Rundfunk, 05.03.2015, Energie Campus Nürnberg
- [210] W. Krcmar. Neue Baustoffe für die Energiewende. Vortrag für SPD-Ausschuss für Wissenschaft und Kunst, 09.03.2015, Energie Campus Nürnberg
- [211] W. Krcmar. Entwicklung neuer höchstwärmedämmender Massivwandbaustoffe. Vortrag anlässlich der Verleihung des Hochschulpreises des Bayerischen Baugewerbes, Oskar von Miller Forum, 26.03.2015, München
- [212] W. Krcmar. Höchstwärmedämmende Baustoffe für die Energiewende. Vortrag anlässlich Besuch von Landrat A. Tritthart (Erlangen-Höchstadt) im Energie Campus Nürnberg, 19.06.2015
- [213] A. Geber; M. Döbbelin; W. Krcmar. Gesamtenergetische Betrachtung eines Industriebetriebs mit Gebäude und Thermoprozessanlagen. Interne Konferenz 24.07.2015, Energie Campus Nürnberg
- [214] W. Krcmar. Neue Bau- und Dämmstoffe. Vortrag anlässlich der Veranstaltung „Wärmeverbundsysteme und Schadensbilder“, ENERGIEregion Nürnberg e.V., 17.11.2015, Energie Campus Nürnberg
- [215] N. Hesse; W. Krcmar. Role of metakaolin type and dehydroxylation temperature in geopolymer synthesis. Vortrag/Beitrag Tagungsband, Advanced Applied Research Conference (AARC) 2015, Nürnberg
- [216] J.P. Müller; N. Hesse; W. Krcmar. Foamed Geopolymeric Insulation Systems. Vortrag/Beitrag Tagungsband, Advanced Applied Research Conference (AARC), 26.06.2016, Augsburg
- [217] N. Hesse; W. Krcmar. Role of metakaolin type and dehydroxylation temperature in geopolymer synthesis. Poster; Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC), Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg, Germany
- [218] W. Krcmar; B. Hintz; H. Pöllmann. Improvement of heat insulation from vertically perforated bricks by reduction of the radiation losses maintaining constant compressive strength. Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC), Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg
- [219] S. Schmidt; H. Pöllmann; W. Krcmar. Contraction of thermal conductivity λ_{10} , tr. of thin-bed mortar in case of consistent compressive strength. Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC), Jul. 11th -12th, 2016, Nuremberg

SIMULATION

- [220] R. German, A. Martin, M. Pruckner, C. Thurner, Energiesystemanalyse Bayern, Besuch von StM Aigner am Energie Campus Nürnberg, Nürnberg, 17.10.2014
- [221] A. Martin, R. German, Teilprojekt SIMULATION, Zwischenevaluierung des Teilprojekts SIMULATION, 28.02.2014
- [222] R. German, Simulation vernetzter Systeme mit Anwendung in den Bereichen Energie, Mobilität und Gesundheit, KIT, Karlsruhe, 20.1.2014
- [223] R. German, Simulationsmodelle für vernetzte intelligente Energiesysteme, Sitzung der IHK-Ausschüsse "Energie | Umwelt" und "Industrie | Forschung | Technologie", Nürnberg, 24.3.2014
- [224] R. German, Energiesystemanalyse 2.0 – Weiterentwicklung in Phase II, Symposium Energie Innovativ 2014, Nürnberg, 15.10.2014
- [225] R. German, Hybride Simulation vernetzter Energiesysteme, TU Dortmund, 21.11.2014
- [226] P. Bazan, R. German, Hybride Simulation eines Hauses mit Photovoltaikanlage und Batteriespeicher, Besuch von Audi des Energie Campus Nürnberg, Nürnberg, 13.1.2014
- [227] R. German, P. Bazan, Hybride Simulation intelligenter Energiesysteme, EnCN-Sim Evaluierung, Nürnberg, 28.2.2014
- [228] R. German, Simulation intelligenter Energiesysteme, Besuch von Audi des Energie Campus Nürnberg, 13.1.2014
- [229] R. German, Teilprojekt SIMULATION – Energiesystemanalyse Bayern, Besuch einer Delegation des NRW-Landtages am Energie Campus Nürnberg, 24.1.2014
- [230] R. German, Teilprojekt SIMULATION, Fachbeirat des EnCN, 14.3.2014
- [231] R. German, Simulation vernetzter Energiesysteme, Besuch von MdB Dr. Anton Hofreiter am Energie Campus Nürnberg, 23.7.2014
- [232] M. Pruckner, Ein Rechenmodell für den Energieumstieg in Bayern, Forum "Energiewende Aktiv", Nürnberg, 18.7.2014
- [233] R. German, M. Pruckner, Energiesystemanalyse Bayern - Simulationsmodell, KickOff Projektphase 2, München, 21.7.2014
- [234] R. German, M. Pruckner, Energiesystemanalyse Bayern - Simulationsmodell, 1. Beiratssitzung, Bayern Innovativ Nürnberg, 30.9.2014
- [235] R. German, Energiesystemanalyse 2.0 - Weiterentwicklung in Phase II, 8. Symposium mit Fachausstellung, Maritim Hotel Nürnberg, 15.10.2014
- [236] P. Bazan, Hybride Simulation von Energiesystemen mit i7-AnyEnergy, EnCN-Sim Treffen, Erlangen, 12.05.2014
- [237] P. Bazan, D. Steber, R. German, Hybride Simulation intelligenter vernetzter Energiesysteme, Smart-Grids-Week, Linz (AT), Mai 2015
- [238] D. Steber, R. German, Das Projekt SWARM – Virtuelle 1 MW Großbatterie, Smart-Grids-Week, Linz (AT), Mai 2016
- [239] D. Steber, R. German, Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichersystemen, C.A.R.M.E.N.-Fachgespräch 2016, Fuchstal, 11.10.2016
- [240] D. Steber, Integration of Battery Storage into the German Electrical Power System, DACH Energieinformatik 2016, Klagenfurt (AT), September 2016
- [241] M. Schmidt. Penalty Alternating Direction Methods for Mixed-Integer Optimization: A New View on Feasibility Pumps. OR 2016 - Annual International Conference of the German Operations Research Society. 31.08.2016. Hamburg.
- [242] M. Schmidt. Optimal Price Zones for the German Electricity Market. iSEneC 2016 - Integration of Sustainable Energy Conference. 12.7.2016. Nürnberg.
- [243] G. Orlinskaya. Mixed-Integer Linear Programming for the Day-ahead Operation of Smart Grids. iSEneC 2016. 12.07.2016, Nürnberg
- [244] M. Schmidt. A Penalty Alternating Direction Method for Nonconvex MINLPs in Gas Transport. EURO 2016 - 28th European Conference on Operational Research. 5.7.2016. Poznan.
- [245] M. Schmidt. Graph Partitioning with Connectivity Constraints for Multilevel Electricity Market Models. TU Braunschweig. Seminar des Instituts für Mathematische Optimierung. 23.6.2016. Braunschweig.
- [246] M. Schmidt. Von mehrstufiger Optimierung und Stromnetzen, Graphpartitionierung und Marktpreisen. Unsere Fakultät - Unsere Forschung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 20.6.2016. Erlangen.
- [247] G. Orlinskaya. A Mixed-Integer Linear Smart Grid Model. EnCN-Seminar Energiemarktmodellierung. 25.01.2016. Nürnberg
- [248] M. Schmidt. Feasibility Pumps as Penalty Alternating Direction Methods for MINLPs: Theory and Computations. Leibniz Universität Hannover, Oberseminar Algorithmische Optimierung. 19.5.2016. Hannover.
- [249] M. Schmidt. Mixed-Integer Nonlinear Optimization of Stationary Gas Transport Problems. TU Berlin, Kolloquium Mod-NumDiff. 17.5.2016.
- [250] M. Schmidt. Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung für den Gas- und Stromtransport. Universität Konstanz, Seminar der AG Numerik (Fachbereich Mathematik & Statistik). 11.5.2016.

- [251] M. Schmidt. Investition in Netz und Erzeugung in liberalisierten Strommärkten. 11th ÖGOR – IHS Workshop on "Mathematical Economics and Optimization in the Energy Sector" 2016, 27./28.4.2016. Institut für Höhere Studien (IHS). Wien
- [252] M. Schmidt. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets. OR 2015. Wien.
- [253] M. Schmidt. Solving Power-Constrained Gas Transport Problems using an MIP-based Alternating Direction Method. ISMP 2015. Pittsburgh
- [254] M. Schmidt. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. Oberseminar Algorithmische Optimierung. Leibniz Universität Hannover. 23.02.2015. Hannover
- [255] M. Schmidt. State-of-the-Art in Gas Transport Optimization. Workshop on Gas Transport and Gas Market Modeling. Energie Campus Nürnberg. 15.12.2014
- [256] M. Schmidt. Continuous Reformulations for Mixed-Integer Nonlinear Optimization of Gas Compressor Stations. International Conference on Operations Research 2014 (OR 2014). 3.9.2014. Aachen
- [257] M. Schmidt. Optimierung - Die Mathematik der Energiewende. Tag der Erlanger Mathematik, 04.07.2014. Erlangen
- [258] A. Martin. Techniques from Mixed Integer Linear Programming to solve Mixed Integer Nonlinear Programs. Magdeburg Lectures on Optimization and Control, Magdeburg, März 2014
- [259] A. Martin. Das Potential mathematischer Optimierung und ihre Bedeutung für die Ingenieurwissenschaften, 1. Workshop "Operations Research in den Ingenieurwissenschaften", Asselheim, April 2014
- [260] A. Martin. Reduktion und Prozessverbesserung durch Mathematik: Suffizienzanstze durch Diskrete Optimierung, Kongress "Besser, anders, weniger -- Suffizienz in der Baukultur", Darmstadt, Mai 2014
- [261] A. Martin. May MIP Techniques help to solve MINLPs, Mixed Integer Nonlinear Programming 2014, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, Juni 2014
- [262] A. Martin. Mixed Integer Programming for Energy Networks, School on "Graph Theory, Algorithms and Applications" at the "International School of Mathematics -- Guido Stampacchia", Erice, Sizilien, Sept. 2014
- [263] A. Martin. Solving network problems including physical transport, Workshop on Combinatorial Optimization, Oberwolfach, Nov. 2014
- [264] A. Martin. Mathematical modeling, simulation, and optimization using the example of gas networks, ICIAM 2015, Peking, Aug. 2015
- [265] A. Martin. Towards a hierarchy of consistent models for network problems with physical transport, Workshop on Mixed Integer Nonlinear Programming Optimization, Oberwolfach, Okt. 2015
- [266] A. Martin. Optimierte ist nicht optimal: Energiekosten senken durch intelligente Planung, Vortragsreihe "Wissenschaft auf AEG", Nürnberg, Nov. 2015
- [267] A. Martin. Progress and Challenges in Network Optimization, Conference "The Digital Future", Berlin, Mai 2016
- [268] A. Martin. Combinatorial Optimization Problems with Physical Constraints, BMS Friday Colloquium, Berlin Mathematical School (BMS), Berlin, Okt. 2016
- [269] Martin. Energiesystemanalyse Bayern- Erläuterungen zum Optimierungsmodell. 6. Sitzung des Arbeitsforums "Kraftwerke und Speicher", München, Jun 2016
- [270] Martin. Energiemanagement- Wie smart managen wir Energie wirklich?, Challenge Workshop: Mathematische Modellierung und Optimierung zukünftiger Energienetze, Heidelberg, Mai 2013
- [271] Martin. An Energy System Analysis - How smart do we manage our energy?, Sino-German OR Workshop,
- [272] Martin. Energy System Analysis - A Case Study, Energy Symposium, Tchech Academy of the Sciences (ASCR), Prague, Dez. 2013
- [273] F. Liers. Energiesystemanalyse, Smart-Grid-Solar Workshop, Hof, Mai 2016
- [274] C. Thurner. Wie Smart Managen wir Energie Wirklich? VDI-Expertenforum, Karlsruhe, März 2013
- [275] C. Thurner. Optimal Capacity Expansion Planning for Energy Systems. Euro-Informs, 26th European Conference on Operations Research, Rome, Juli 2013
- [276] C. Thurner. Energiesystemanalyse Bayern - Optimierungsmodell, KickOff Projektphase 2, München, 21.7.2014
- [277] C. Thurner. Energiesystemanalyse Bayern- Optimierungsmodell, 1. Beiratssitzung, Bayern Innovativ Nürnberg, 30.9.2014
- [278] C. Thurner. Optimal Capacity Expansion Planning for Energy Systems: Models, Methods and Solutions. EnCN Energieseminar, Nürnberg, Jun 2016
- [279] R. German, R. Berndt, E. Masalkina, Co-Simulation elektrifizierter & kommunikationsfähiger Fahrzeugflotten, EnCN-Sim Evaluierung, Nürnberg, 28.2.2014
- [280] R. Berndt, E. Masalkina, D. Eckhoff, R. German, Co-Simulation zur Bewertung und Optimierung elektrifizierter & kommunikationsfähiger Fahrzeugflotten, Besuch von Audi des Energie Campus Nürnberg, Nürnberg, 13.1.2014
- [281] S. Schellenberg, R. Berndt, D. Eckhoff, R. German, Schaufenster Elektromobilität e-NUE, Forschungsgespräche BMW AG, München, 05.06.2014

- [282] R. German, R. Berndt, S. Schellenberg, D. Eckhoff, Schaufenster Elektromobilität e-NUE, Übergabeveranstaltung Welle 1, e-NUE, Nürnberg, 18.07.2014
- [283] R. German, R. Berndt, S. Schellenberg, D. Eckhoff, Schaufenster Elektromobilität e-NUE, Übergabeveranstaltung Welle 2, e-NUE, Nürnberg, 27.09.2014
- [284] Christian Bewermeyer, Rüdiger Berndt, Sebastian Schellenberg, Reinhard German und David Eckhoff, cOSMetic - Towards Reliable OSM to SUMO Network Conversion, 7th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2015), Kyoto, Japan, Dezember 2015
- [285] Maximilian Merkert. Solving Network Expansion Problems via Iterative Graph Aggregation. 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 12.03.2014, Erlangen
- [286] Maximilian Merkert. Structural investigation of piecewise linearized flow problems. 19th Combinatorial Optimization Workshop at CNRS Centre Paul Langevin, 08.01.2015, Aussois
- [287] Maximilian Merkert. Structural investigation of piecewise linearized flow problems. 22nd International Symposium on Mathematical Programming, 16.07.2015, Pittsburgh
- [288] Maximilian Merkert. Structural investigation of piecewise linearized flow problems. 7th European Congress of Mathematics, 19.07.2016, Berlin
- [289] Maximilian Merkert. Multiple Choice Problems under Staircase Compatibilities. Annual International Conference of the German Operations Research Society, 31.08.2016, Hamburg

DESIGN

- [290] S. Dotenco, M. Dalsass, L. Winkler, T. Würzner, C. Brabec, A. Maier, and F. Gallwitz: Automatic Detection and Analysis of Photovoltaic Modules in Aerial Infrared Imagery, Proc. WACV 2016: IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Lake Placid, NY, USA, March 2016
- [291] F. Gallwitz, S. Deitsch, M. Dalsass: *Towards Fully Autonomous Aerial Inspection of Photovoltaic Power Plants*, Integration of Sustainable Energy Conference (iSEneC 2016), Nuremberg, July 2016

ECONOMY

- [292] G. Zöttl. Investment Incentives and Electricity Spot Market Competition. Universität Augsburg, Februar 2012
- [293] V. Grimm. Vorstellung des Teilprojekts Economy. Beiratssitzung des EnCN, März 2012
- [294] G. Zöttl. Vortrag. EnCN-Konferenz, 04.04.2012
- [295] G. Zöttl. Challenges in the Design of Electricity Markets. Keynote Enerday Konferenz, Universität Dresden, Juni 2012
- [296] G. Zöttl. The Impact of Transmission Pricing in Energy Markets. Energiemarktkonferenz, Universität Mannheim, Juni 2012
- [297] C. Leepa. Vortrag. EnCN-Konferenz, 27.09.2012
- [298] V. Grimm; A. Martin. Herausforderungen von Energiemärkten: Betrachtungen aus Sicht eines Mathematikers und einer Volkswirtin. Nürnberg, 05.12.2012
- [299] V. Grimm. Investitionsanreize im liberalisierten Strommarkt. UniBund, Erlangen. 07.12.2012
- [300] G. Zöttl. The Impact of Transmission Pricing in Network Industries. University of Toulouse, 17.01.2013
- [301] V. Grimm. An Experiment on Emissions Trading: The Effect of Different Allocation Mechanisms. Institute for Competition Economics, Düsseldorf, 22.01.2013
- [302] G. Zöttl. Investment- and Technology-Choice under Uncertain and Fluctuating Demand: the case of electricity markets. TU München, 30.01.2013
- [303] V. Grimm. An Experiment on Emissions Trading: The Effect of Different Allocation Mechanisms. University of Essex, 06.03.2013
- [304] V. Grimm. Überblick über die Arbeit des Bereichs ECONOMY. EnCN Beirat, 15.03.2013
- [305] G. Zöttl. Investitionsentscheidungen und Technologiewahl in Elektrizitätsmärkten. University of Münster, 13.04.2013
- [306] V. Grimm. An Experiment on Emissions Trading: The Effect of Different Allocation Mechanisms. Universität Jena, 25.04.2013
- [307] V. Grimm. Investitionsanreize im liberalisierten Energiemarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. CSU, Arbeitsgruppe Energiepolitik, 11.05.2013
- [308] V. Grimm. Investitionsanreize im liberalisierten Energiemarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. N-Ergie, 04.07.2013

- [309] V. Grimm. Strommarktmodellierung am EnCN. E-ON, 04.10.2013
- [310] G. Zöttl. Transmission and Generation Investment under Market Coupling and Redispatch: A Computable Equilibrium Framework. DIW Berlin, Belec-Konferenz, 10.10.2013
- [311] V. Grimm. Investitionsanreize im liberalisierten Energiemarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. Lange Nacht der Wissenschaften, Nürnberg, 19.10.2013
- [312] V. Grimm. Strommarktmodellierung am EnCN. Thyssen AG, Essen, 12.11.2013
- [313] V. Grimm. Transmission and Generation Investment under Market Splitting and Redispatch: A Computable Equilibrium Framework. Delmenhorst, 28.11.2013
- [314] G. Zöttl. Die Auswirkung der Bepreisung von Netzdienstleistungen auf Investitionsentscheidungen. Delmenhorst, 28.11.2013
- [315] V. Grimm. Zwischenergebnisse EnCN Economy. Evaluation des EnCN, Nürnberg, 28.02.2014
- [316] V. Grimm; C. Leepa; A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl. Herausforderungen am deutschen Strommarkt, Investitionsanreize am deutschen Strommarkt & Das EnCN-Strommarktmodell. Zwischenevaluierung (Posterpräsentationen). EnCN Nürnberg, 28.02.2014
- [317] V. Grimm. Vorstellung der Arbeiten von EnCN Economy. EnCN Fachbeirat, Nürnberg, 14.03.2014
- [318] V. Grimm; G. Zöttl. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. EFI-Meeting, 02.04.2014
- [319] G. Zöttl. Ökonomie der Energiewende – Herausforderungen der Systemintegration erneuerbarer Energien. Universität Oldenburg, 03.04.2014
- [320] V. Grimm. Investitionsanreize im liberalisierten Strommarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. Delmenhorst, 04.06.2014
- [321] C. Sölch. Cost-based Redispatch and Market-based Redispatch: Does redispatch cost minimization always imply welfare maximization. MDS Seminar, Nürnberg, 17.06.2014
- [322] V. Grimm; G. Zöttl. Investitionsanreize im liberalisierten Strommarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. Seminarveranstaltung in Kooperation mit der N-Ergie AG, Nürnberg, 27.06.2014
- [323] C. Sölch; M. Weibelzahl. Investitionsanreize im liberalisierten Strommarkt: Herausforderungen mit Blick auf die Energiewende. 4. Interne EnCN-Konferenz, Nürnberg, 04.07.2014
- [324] V. Grimm. Strommarktmodellierung am EnCN. Besuch von Anton Hofreiter MdB am EnCN, 23.07.2014
- [325] V. Grimm. Strommarktmodellierung am EnCN. Besuch von Min. Kunst am EnCN, 23.07.2014
- [326] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: A Computable Equilibrium Framework. Amerika-Institut, Nürnberg, Juli 2014
- [327] V. Grimm; G. Zöttl. Modellierung von Investitionsentscheidungen Verteilnetzen. EFI-Meeting, Nürnberg, 14.10.2014
- [328] V. Grimm. Investitionsanreize im Energiesektor. Expertenkommission zur Stärkung der Investitionsanreize in Deutschland, Berlin, 17.10.2014
- [329] V. Grimm; C. Leepa; A. Martin; C. Sölch; M. Weibelzahl; G. Zöttl. Herausforderungen am deutschen Strommarkt, Investitionsanreize am deutschen Strommarkt & Das EnCN-Strommarktmodell (Posterpräsentationen). Besuch von StM Ilse Aigner am EnCN, Nürnberg, 17.10.2014
- [330] C. Sölch. Modellierung von Verteilnetz und Verteilnetzbetreibern unter expliziter Berücksichtigung alternativer Marktregeln. Workshop "Implementierung im Marktumfeld" mit den Verteilnetzbetreibern, Hof, 31.10.2014
- [331] G. Zöttl. Energiemärkte im Wandel – Herausforderungen für Tarifstruktur und Kapazitätsmärkte. WU Wien, 04.11.2014
- [332] V. Grimm. Ausschreibungen und Auktionen als Instrument für die Allokation knapper Güter: Rahmenbedingungen für ein funktionsfähiges Auktionsdesign. Expertengremium des Schleswig-Holsteinischen Energiewendeministeriums, Kiel, 20.11.2014
- [333] V. Grimm; S. Mehl. Ergebnisse der ersten Kundenbefragung im SWARM-Projekt. Nürnberg, 11.12.2014
- [334] V. Grimm. Investieren im liberalisierten Strommarkt - Welche unternehmerischen Risiken birgt die Energiewende? EFI-Lecture, 19.01.2015
- [335] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Impact of Market Splitting and Network Fee Regimes. IEB Barcelona, 03.02.2015
- [336] V. Grimm. Investitionsanreize im Energiesektor. Impulsvortrag in der Expertenkommission „Stärkung von Investitionen in Deutschland“. BMWi, 26.02.2015
- [337] V. Grimm. Impulsvortrag anlässlich des Besuchs der EU-Kommissarin Georgieva. EU-Vertretung, Berlin, 06.03.2015
- [338] V. Grimm. Economy im Energie Campus Nürnberg. Fachbeirat EnCN, 13.03.2015
- [339] C. Sölch. Cost-based Redispatch vs. Market-based Redispatch. International Ruhr Energy Conference, Essen, 23.03.2015
- [340] V. Grimm; G. Zöttl. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. Treffen mit den Experten der Monopolkommission, Nürnberg, 01.04.2015

- [341] S. Mehl. SWARM-Pressekonferenz, 23.04.2015
- [342] V. Grimm. Investitionsanreize im Strommarkt. Campus FES Steering Board Meeting, 24.04.2015
- [343] C. Sölch. Cost-based Redispatch vs. Market-based Redispatch. 4th Mannheim Energy Conference, 07.05.2015
- [344] V. Grimm; G. Zöttl. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. Monopolkommission, Berlin, 01.06.2015
- [345] V. Grimm. Strommarktmodellierung am EnCN. ThyssenKrupp, München, 12.06.2015
- [346] G. Zöttl. Congestion management regimes: long run impacts. Annual European Forum on Grid Integration & Electricity Ancillary Services, Berlin, 15.-16.06.2015
- [347] V. Grimm. Podiumsdiskussion „Strommarkt 2.0“ mit MdB Göppel am EnCN, 22.06.2015
- [348] V. Grimm. Vortrag zur Strommarktmodellierung. N-ERGIE, 09.07.2015
- [349] G. Zöttl. Congestion management regimes: long run impacts. ELEMENTS OF A NEW TARGET MODEL FOR EUROPEAN ELECTRICITY MARKETS, Paris, 08.-09.07.2015
- [350] V. Grimm; S. Mehl. Vortrag zum aktuellen Stand der Kundenbefragungen im Rahmen des Projekts SWARM. N-ERGIE, 16.07.2015
- [351] V. Grimm. Energiemarktdesign für die Energiewende. 21 Smart Grid Solar, Hof, 21.07.2015
- [352] G. Zöttl. Energiewende und Strommarktdesign: Investitionsanreize in liberalisierten Energiemärkten. Clusterforum Modellprojekt Smart Grid Solar, Hof, 22.07.2015
- [353] C. Sölch. Auswirkungen rechtlicher Rahmenbedingungen auf Investitionsentscheidungen in Smart Grids. Clusterforum Modellprojekt Smart Grid Solar, Hof, 22.07.2015
- [354] J. Grübel. Zeitgleiche Modellierung von Erzeugung, Speicherung und Netzausbauplanung in Smart Grids. Interne EnCN-Konferenz, 24.07.2015
- [355] B. Rückel. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. Interne EnCN-Konferenz, 24.07.2015
- [356] V. Grimm. Investitionsanreize im Strommarkt: Ergebnisse der Modellierung des deutschen Strommarkts. Campus FES Steering Board Meeting, 31.07.2015
- [357] G. Zöttl. Network Management Regimes in Electricity and Gas Markets in Energy and Environment. Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Operations Research (GOR), Wien, 02.09.2015
- [358] C. Sölch. Regionally Differentiated Network Fees to Provide Proper Incentives for Generation Investment. OR, Wien, 03.09.2015
- [359] G. Zöttl. Congestion management regimes: long run impacts. Workshop von Universität Köln und EWI, 16.09.2015
- [360] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. II Conferencia de Estudios Estratégicos, Havanna, Cuba, 14.10.2015
- [361] V. Grimm. Flexible Verbraucher am Deutschen Strommarkt. ThyssenKrupp, Duisburg, 22.10.2015
- [362] V. Grimm. Wie viele Stromtrassen braucht Deutschland – wo und warum? Lange Nacht der Wissenschaften, 24.10.2015
- [363] M. Ambrosius; J. Grübel; S. Mehl; B. Rückel; C. Sölch. Posterpräsentation zur EnCN Strommarktmodellierung und zum Projekt SWARM. Lange Nacht der Wissenschaften, 24.10.2015
- [364] G. Zöttl; B. Rückel. Implementierung eines Smart Grids im Marktumfeld. Projekttreffen SGS in Arzberg, 11.11.2015
- [365] V. Grimm. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. BNetzA, Abteilung Energieregulierung, 27.11.2015
- [366] V. Grimm; G. Zöttl. Flexible Verbraucher im Deutschen Strommarkt. Workshop mit der ThyssenKrupp AG, Nürnberg, 07.01.2016
- [367] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. Master and Doctoral Seminar, FAU Nürnberg, 12.01.2016
- [368] B. Rückel. Market designs for Smart Grids. Workshop zum Projekt SGS, EnCN/ZAE, am EnCN Nürnberg, 25.01.2016
- [369] V. Grimm. Die Transformation der Energieversorgung und der Strommarkt der Zukunft. Forum Energiewende E(h)rlangen, 07.03.2016
- [370] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Liberalized Electricity Markets: The effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. Industrieökonomischer Ausschuss des Vereins für Socialpolitik, Regensburg, 10.03.2016
- [371] V. Grimm. EnCN – Energy Market Design. Nürnberg-München Energy Workshop, Nürnberg, 17.03.2016
- [372] C. Sölch. Transmission and generation investment in liberalized electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. Nürnberg-München Energy Workshop, Nürnberg, 17.03.2016
- [373] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. 11th Conference on Energy Economics and Technology (ENERDAY), Dresden, 08.04.2016
- [374] V. Grimm; G. Zöttl. Flexible Verbraucher im Deutschen Strommarkt. Workshop mit der ThyssenKrupp AG, 13.04.2016
- [375] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Workshop „Strommarkt: Netzausbau und Marktdesign“, EnCN/DIW, am DIW Berlin, 27.04.2016
- [376] J. Grübel. Gas Market Analysis. Workshop „Strommarkt: Netzausbau und Marktdesign“, EnCN/DIW, am DIW Berlin, 27.04.2016

- [377] B. Rückel. Reduction of Transmission Investment by Redispatch and Feed-In Management. Workshop „Strommarkt: Netzausbau und Marktdesign“, EnCN/DIW, am DIW Berlin, 27.04.2016
- [378] V. Grimm. Flexible Consumers in the German Electricity Market. Workshop mit der ThyssenKrupp AG, Essen, 06.06.2016
- [379] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Energy Consumption in the Industry. 13th International Conference on the European Energy Market, Porto, Portugal, 07.06.2016
- [380] V. Grimm. Investitionsanreize im Strommarkt: Welches Marktdesign führt zu mehr Kosteneffizienz?. EconWatch, Berlin, 13.06.2016
- [381] S. Mehl. SWARM Ergebnispräsentation. 6. Projektbesprechung, 15.06.2016
- [382] V. Grimm. The legal framework and expected expansion of renewables and grids. Treffen der Deutschen und der Schwedischen Handelskammern, Stockholm, 16.06.2016
- [383] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Workshop „Strommarktmodellierung an der FAU“, am EnCN Nürnberg, 17.06.2016
- [384] J. Grübel. Applications of linearized power flow in Smart Grids. Workshop „Strommarktmodellierung an der FAU“, am EnCN Nürnberg, 17.06.2016
- [385] V. Grimm; G. Zöttl. Dezentralität und zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Vortrag bei der N-Ergie AG, 21.06.2016
- [386] V. Grimm; S. Mehl. Projekt SWARM – Ergebnisse der Kundenakzeptanzforschung. Cluster-Treff Bayern Innovativ, Energie Campus Nürnberg, 29.06.2016
- [387] L. Schewe. A multilevel programming approach for gas market analysis. 28th European Conference on Operational Research, 03.-06.07.2016
- [388] J. Grübel. Distribution network modeling in electricity market environment. Integration of Sustainable Energy Conference – iSEneC, 11.07.2016
- [389] B. Rückel. Simultaneous Generation, Storage and Transmission Expansion Planning in Smart Grids. iSEneC, Nürnberg, 11.07.2016
- [390] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Integration of Sustainable Energy Conference, Nürnberg, 12.07.2016
- [391] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. Integration of Sustainable Energy Conference, Nürnberg, 12.07.2016
- [392] C. Sölch. The Impact of Market Design on Transmission and Generation Investment in Electricity Markets. Québecer Unternehmensdelegation Energiewirtschaft am EnCN, Nürnberg, 14.07.2016
- [393] B. Rückel. Endogenous positioning of renewable energies – impacts on the need of grid expansion. Nürnberg-München Energy Workshop, ENCN/TU München/ifo Institut, an der TU München, 22.09.2016
- [394] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Nürnberg-München Energy Workshop, ENCN/TU München/ifo Institut, an der TU München, 22.09.2016
- [395] V. Grimm. Energy Market Modelling: Investment Incentives under European Energy Market Designs. TRR 154 Mathematics of Gas Transport Conference, Berlin, 06.10.2016
- [396] V. Grimm; gemeinsam mit Josef Hasler (N-Ergie AG) und Frank Peter (Prognos AG). Pressekonferenz zur Studie Dezentralität und zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf, 07.10.2016
- [397] V. Grimm. Dezentralität und zellulare Optimierung – Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Dialog "Energiewende - regional und dezentral", 28.10.2016
- [398] V. Grimm. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes. Energiemärkte im Wandel – Innovationsanreize und Umsetzung der Klimaziele von Paris, Workshop an der Universität Wien, 08.11.2016
- [399] C. Sölch. Smart Grid Solar – Implementierung im Marktumfeld. Wissenschaftliche Leitung SGS in Erlangen, 11.11.2016
- [400] M. Ambrosius. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Master and Doctoral Seminar, FAU Nürnberg, 15.11.2016
- [401] C. Sölch. Investment Incentives for Flexible Demand Options under Different Market Designs. Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES), Edinburgh, 18.11.2016
- [402] V. Grimm. 7. Energiepolitischer Workshop, München, 09.12.2016
- [403] V. Grimm; S. Mehl. SWARM Ergebnispräsentation, 12.12.2016
- [404] J. Grübel; B. Rückel; C. Sölch. Ergebnispräsentation SGS-Projekt. Internes Seminar EnCN/ZAE, Nürnberg, 22.12.2016

ACCEPTANCE

- [405] C. Adrian; F. Pfaffenberger. The media and the NIMBY: Influence of news consumption on energy technology acceptance, ECREA, Prague 2016
- [406] D. Arlt; M. Lang; S. Merkle; Zeh. Who is leading in the energy discourse? A content analysis on the influence of different actors within the energy debate in the German press coverage. IAMCR, Montreal, 2015.
- [407] D. Arlt; R. Zeh; M. Lang; S. Merkle. Wer dominiert den deutschen Energiediskurs in den Medien? Eine Analyse zum Einfluss unterschiedlicher Akteure auf die Berichterstattung über die Energiewende. Tagung Energiediskurs. Winterthur, 2015.
- [408] R. Zeh; D. Arlt; M. Lang; S. Merkle. Un-)wissenschaftlicher Energiediskurs? Eine Analyse zum Stellenwert der Wissenschaft in der deutschen Presseberichterstattung über die Energiewende. 2. Jahrestagung der Ad-hoc-Gruppe „Wissenschaftskommunikation“ der DGPK, 2015.
- [409] M. Lang. Reframing renewable energy-technologies. Media monitoring of the German press. IAMCR, Hyderabad, 2014
- [410] T. Oden; R. Zeh. Reframing the energy-debate. Comparing Swedish and German press coverage on energy issues. IAMCR, Dublin, 2013.

Professur Lösungsprozessierbare Halbleitermaterialien

- [411] M. Sytnyk, E. D. Głowacki, N. Serdar Sariciftci, Wolfgang Heiss, Colloidal organic semiconductor micro- and nanocrystals – devices and applications. 7th International Conference on Nanoscience with Nanocrystals, Marburg, Germany, April 4-8 (2016)
- [412] R. T. Lechner, M. Burian, H. Amenitsch, C. Karner, M. Yarema, W. Heiss, C. Delago, O. Paris, Dynamics of Colloidal Crystallization and the Influence of the Nanocrystal Shape Revealed by in-situ Synchrotron SAXS, MRS Fall Meeting & Exhibit 2015, Boston, USA, November 29-December 4.(2015)

Professur Energieeffiziente Produktionstechnologien

- [413] Hauf, D.; Meike, D.; Franke, J.: Energy consumption modeling within the virtual commissioning tool chain, Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg Sweden, 2015
- [414] Javied, T.; Rackow, T.; Franke, J.: Implementing energy management systems to increase energy efficiency in manufacturing companies, CIRP 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Johor Bahru Malaysia, 2014

Gefördert durch

Bayerische Staatsregierung



Die Bayerische Staatsregierung fördert den Aufbau des Energie Campus Nürnberg mit 50 Millionen Euro für einen Zeitraum von 5 Jahren im Zusammenhang mit dem „Strukturprogramm Nürnberg/Fürth“. Das Strukturprogramm mit einem Volumen von insgesamt 115 Millionen Euro über 5 Jahre ist Teil der Initiative „Aufbruch Bayern“.

Unterstützt durch



Preisträger





**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

Gründungspartner:



Gefördert:

Bayerische Staatsregierung

